



OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE UNA PIEZA METÁLICA PARA ADAPTARLA A FABRICACIÓN ADITIVA

Proyecto Fin de Carrera



INGENIERÍA INDUSTRIAL TÉCNICA MECÁNICA
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
OCTUBRE 2015

PROFESOR: ANTONIO DÍAZ ÁLVAREZ
ALUMNA: MARIA VICTORIA VIANA COLINO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



AGRADECIMIENTOS

A Antonio Díaz, por ser mi tutor, y a José Díaz, sin su ayuda no lo habría conseguido.

A mi familia por estar siempre ahí.

A Aarón por echarme tanto la bronca.

A Kaldito y Edu por abrirme el camino, y por las risas echadas en el proceso.

A Elvira León, Nicolás Farpal y Juan Pan por su ayuda y sus conocimientos.



LISTA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	1
LISTA DE CONTENIDOS	3
INDICE DE FIGURAS	5
INDICE DE TABLAS	7
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. VISIÓN GENERAL DEL DISEÑO OPTIMIZADO PARA FABRICACIÓN ADITIVA	11
1.2. FABRICACIÓN ADITIVA	12
1.2.1. Tipos de fabricación aditiva	14
1.2.2. Aplicaciones y sectores de incidencia	19
2. DEFINICIÓN DEL ESTUDIO	22
2.1. PIEZA A OPTIMIZAR	22
3. HERRAMIENTAS UTILIZADAS	25
3.1. SOLIDTHINKING INSPIRE®	25
3.2. CATIA	28
4. DISEÑO OPTIMIZADO	30
4.1. MODELOS PRE-OPTIMIZACIÓN	30
5. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	35
5.1. ELECCIÓN DEL MODELO ADECUADO	41
6. SUAVIZADO DE FORMA	42
7. FABRICACIÓN	46
7.1. PIEZA ORIGINAL: FABRICACIÓN POR MECANIZADO	46
7.2. PIEZA OPTIMIZADA: FABRICACIÓN ADITIVA	47
7.3. COMPARATIVA ENTRE FABRICACIÓN CONVENCIONAL Y FABRICACIÓN ADITIVA	50
8. PRESUPUESTO	51
9. CONCLUSIONES	52
10. LÍNEAS FUTURAS	54
GLOSARIO	55
BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXO 1: Cálculo de la carga aplicada	59
ANEXO 2: HERRAJE ORIGINAL. ANÁLISIS.	63



ANEXO 3: PIEZAS ORIGINALES IMPLICADAS EN LA UNIÓN – VISTAS.	66
ANEXO 4: Modelo 1 - Perfil en T. Optimización al 30% de volumen y análisis.	67
ANEXO 5: Modelo 2 - Base en bloque. Optimización al 30% de volumen y análisis.	70
ANEXO 6: Modelo 2 - Base en bloque. Optimización al 20% de volumen y análisis.	73
ANEXO 7: Modelo ajustado. Análisis.....	76
ANEXO 8: Modelo ajustado. Segunda optimización y análisis.....	79
ANEXO 9: Modelo ajustado final. Análisis	82

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de Estereolitografía (SLA).....	15
Figura 1.2. Esquema de Sinterización Selectiva por Láser (SLS)	16
Figura 1.3. Esquema de Impresora 3D (SLS).....	17
Figura 1.4. Esquema de Fusión por Haz de Electrones (EBM).....	18
Figura 1.5. Esquema de Máquina de Deposición de Hilo Fundido (FDM).....	19
Figura 1.6. Incidencia de la fabricación aditiva en los diferentes sectores (Wohlers Report 2012).....	20
Figura 2.1. Herraje para optimización topológica, objetivo en el presente estudio.....	23
Figura 3.1. Interfaz gráfica del software Inspire.....	25
Figura 3.2. Barra de herramientas principal del software Inspire	26
Figura 3.3. Ejemplo de interfaz del programa CATIA	29
Figura 4.1. Modelo 1: Perfil en T. Pre-optimización.....	31
Figura 4.2. Definición del material “Titanio Arcam” en INSPIRE®, y sus propiedades.....	32
Figura 4.3. Modelo 1: Perfil en T. Pre-optimización. Cargas y restricciones aplicadas.....	32
Figura 4.4. Modelo 2: Perfil con base bloque. Pre-optimización.....	33
Figura 4.5. Modelo 2: Perfil con base bloque. Detalle de soportes aplicados.....	34
Figura 4.6. Modelo 2: Perfil con base bloque. Pre-optimización. Cargas y restricciones aplicadas.....	35
Figura 5.1. Ventana de Optimización en la herramienta INSPIRE®.....	36
Figura 5.2. Modelo 1 optimizado en la herramienta INSPIRE®.....	37
Figura 5.3. Modelo 2 optimizado en la herramienta INSPIRE®.....	39
Figura 5.4. Modelo 2 optimizado en la herramienta INSPIRE® al 20% de masa.....	41
Figura 6.1. Suavizado de formas en el programa CATIA	42
Figura 6.2. Modelo 1 optimizado. Suavizado de formas.....	43
Figura 6.3. Modelo ajustado. Segunda optimización.....	44
Figura 6.4. Modelo 1 optimizado. Segunda optimización. Suavizado de formas	45
Figura 7.1. Máquina ARCAM A2X de fabricación aditiva por EBM.	48
Figura A1.1. Representación esquemática del fallo a tracción.....	59
Figura A1.2. Representación esquemática del fallo a cortadura	60
Figura A1.3. Representación esquemática del fallo por aplastamiento.....	61
Figura A2.1. Herraje original. Modelo con cargas y restricciones aplicadas.....	63
Figura A2.2. Herraje original. Tensión de Von Mises.....	63
Figura A2.3. Herraje original. Detalle máxima tensión de Von Mises.....	64
Figura A2.4. Herraje original. Factor de seguridad.....	64
Figura A2.5. Herraje original. Desplazamiento máximo.....	65
Figura A2.6. Herraje original. Cálculo de masa.....	65
Figura A3.1. Herraje macho. Vistas y medidas.....	66
Figura A3.2. Herraje hembra. Vistas y medidas.....	66
Figura A4.1. Modelo 1 optimizado.....	67
Figura A4.2. Modelo 1 optimizado. Tensiones de Von Mises.....	68
Figura A4.3. Modelo 1 optimizado. Detalle de tensión máxima de Von Mises.....	68
Figura A4.4. Modelo 1 optimizado. Factor de seguridad.....	68
Figura A4.5. Modelo 1 optimizado. Desplazamiento máximo.....	69
Figura A4.6. Modelo 1 optimizado. Cálculo de masa.....	69

Figura A5.1. Modelo 2 optimizado.	70
Figura A5.2. Modelo 2 optimizado. Tensiones de Von Mises.	70
Figura A5.3. Modelo 2 optimizado. Detalle de tensión máxima de Von Mises.	71
Figura A5.4. Modelo 2 optimizado. Factor de seguridad.	71
Figura A5.5. Modelo 2 optimizado. Desplazamiento máximo.	72
Figura A5.6. Modelo 2 optimizado. Cálculo de la masa del conjunto.	72
Figura A6.1. Modelo 2 optimizado al 20%.	73
Figura A6.2. Modelo 2 optimizado al 20%. Tensiones de Von Mises.	73
Figura A6.3. Modelo 2 optimizado al 20%. Factor de seguridad.	74
Figura A6.4. Modelo 2 optimizado al 20%. Desplazamiento máximo.	74
Figura A6.5. Modelo 2 optimizado al 20%. Cálculo de masa.	75
Figura A7.1. Modelo ajustado. Tensiones de Von Mises.	76
Figura A7.2. Modelo ajustado. Detalle de tensión máxima de Von Mises.	76
Figura A7.3. Modelo ajustado. Factor de seguridad.	77
Figura A7.4. Modelo ajustado. Desplazamiento máximo.	77
Figura A7.5. Modelo ajustado. Cálculo de masa.	78
Figura A8.1. Modelo ajustado. Segunda optimización.	79
Figura A8.2. Modelo ajustado. Segunda optimización. Tensiones de Von Mises.	79
Figura A8.3. Modelo ajustado. Segunda optimización. Detalle de tensión máxima de Von Mises.	80
Figura A8.4. Modelo ajustado. Segunda optimización. Factor de seguridad.	80
Figura A8.5. Modelo ajustado. Segunda optimización. Desplazamiento máximo.	81
Figura A8.6. Modelo ajustado. Segunda optimización. Cálculo de masa.	81
Figura A9.1. Modelo ajustado final. Tensiones de Von Mises.	82
Figura A9.2. Modelo ajustado final. Detalle de tensión máxima de Von Mises.	82
Figura A9.3. Modelo ajustado final. Factor de seguridad.	83
Figura A9.4. Modelo ajustado final. Desplazamiento máximo.	83
Figura A9.5. Modelo ajustado final. Cálculo de masa.	84



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de los materiales fabricables, Ti-6Al-4V AMS 4992 y Ti-6Al-4V Arcam.	24
Tabla 2. Máquina ARCAM A2X de fabricación aditiva por EBM. Especificaciones	48
Tabla 3. Resumen de presupuesto.....	51
Tabla 4. Resumen de comparación de parámetros inicial - optimizado.	53



RESUMEN

La fabricación aditiva o impresión 3D es una tecnología basada en la creación de piezas mediante la superposición de capas de material hasta completar el sólido. En la última década su evolución ha experimentado grandes progresos y sus múltiples aplicaciones han llamado la atención de un gran número de empresas de todos los sectores. Actualmente está en pleno auge gracias al perfeccionamiento de las tecnologías y las ventajas que proporciona en cuestión de tiempos y costes. En el apartado de Estado del Arte del presente estudio se han presentado estas técnicas, las más importantes y utilizadas, indicando cómo funcionan y señalando sus ventajas y sus inconvenientes.

Uno de los sectores más beneficiados por la fabricación aditiva es el sector aeronáutico. Su continua búsqueda de la reducción de pesos y la necesidad de simplificar la fabricación de piezas con configuraciones complejas, están totalmente reflejados en la filosofía que aporta esta nueva tecnología de fabricación. Dichos propósitos han inspirado la creación de este estudio, pretendiendo demostrar cómo la aplicación de esta tecnología mejoraría en todos los aspectos los procesos de diseño y fabricación.

Este proyecto está enfocado en la optimización topológica de una pieza, componente de una estructura aeronáutica, para su futura fabricación mediante impresión 3D, en concreto mediante EBM – fusión por haz de electrones. Se ha realizado la optimización de la pieza mediante la herramienta especializada Inspire®, partiendo de dos modelos distintos de base, a los que se les ha aplicado las restricciones de diseño y las cargas soportadas por la pieza original. El proceso consta de varias iteraciones, análisis y pruebas, para obtener un modelo apto para la fabricación que cumple los objetivos necesarios. Para finalizar el estudio, y teniendo en cuenta el modelo optimizado conseguido, se hace una comparación de los parámetros de fabricación entre este nuevo método y la fabricación convencional, evaluando los tiempos, costes y sobre todo material utilizado, que es uno de los factores más importan en la industria aeronáutica.

Los resultados obtenidos pueden ser útiles en la evaluación de la implementación de este proceso en un caso real, ya que facilita la selección del método, indica un método de optimización a seguir y proporciona el rango de mejora obtenido comparado con una fabricación convencional por mecanizado.

ABSTRACT

Additive manufacturing, also known as 3D printing, is a technology based on the creation of parts by laying down successive layers of material until the entire object is created. In the last decade its evolution has made great progress and many applications have been discovered, drawing the attention of a large number of companies from all sectors. Currently it is booming, thanks to the improvement of technologies and the advantages provided within manufacturing time and costs. In the State of the Art section of this study these techniques are presented, the most important and used, indicating how they work and pointing out their advantages and disadvantages.

One of the sectors that are benefited most from additive manufacturing is the aerospace sector. The constant search for weight reduction and the need to simplify the manufacture of parts with complex configurations, are fully reflected in the philosophy that brings this new manufacturing technology. These purposes have inspired the creation of this study, wishing to show how the application of this technology would improve the design and manufacturing processes in all aspects.

This project is focused on the topological optimization of a part, component of an aeronautical structure for future production by 3D printing, particularly through EBM (Electron Beam Melting). The optimization of the part has been performed by Inspire®, an specialized design tool, from two different base models, where the design constraints and loads on the original part are applied. The process consists of several iterations, analysis and testing to obtain a model suitable for the manufacture that meets the required objectives. To complete the study, considering the optimized model obtained, a comparison of the manufacturing parameters between the new method and the conventional manufacture is done, by evaluating the time, cost and especially the material used, which is one of the factors more valuable into the aviation industry.

The results can be useful in evaluating the implementation of this process in a real case, since it facilitates the selection of the method, indicating an optimization method to follow and provides the range enhancement obtained compared with a conventional manufacturing machining.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. VISIÓN GENERAL DEL DISEÑO OPTIMIZADO PARA FABRICACIÓN ADITIVA

Las técnicas de impresión 3D han cambiado los conceptos de diseño de fabricación, han acabado con las restricciones típicas de la fabricación convencional como el torneado, la forja, etc, para permitir una personalización del producto completa. Se pueden conseguir piezas con gran complejidad geométrica, pero sin afectar a su peso ni su coste. Simplemente se fabrica el diseño inicial que cumple con la funcionalidad buscada, sin tener que ser modificado por restricciones debidas a utillajes u otras causas de la fabricación. Diseños de piezas interconectadas fabricadas a la vez, y modelos con espesores variables, volúmenes densos, o ligeros fabricados en celosía, el abanico de posibilidades cada vez es más amplio. Además, con los avances actuales se puede fabricar en casi cualquier material, incluso con materiales combinados.

Pero, a pesar de las grandes libertades que proporciona en el diseño, la fabricación aditiva también conlleva algunas nuevas limitaciones, distintas a las de los métodos convencionales de fabricación, que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar, como por ejemplo [1]:

- La boquilla se encuentra siempre en dirección de fabricación, normal al plano de deposición de las capas de material. Esto conlleva limitaciones de posición para evitar colisiones de la boquilla con la pieza. Además la velocidad de deposición de material, y con ello el espesor de capa, depende principalmente de la velocidad de la boquilla y de la tasa de material pulverizado. En consecuencia, las aceleraciones pueden causar variaciones en la estructura, y deben reducirse al mínimo, evitando esquinas afiladas, sustituyéndolas por superficies redondeadas.
- La generación de soportes supone un reto para el diseño. Sirven para evitar que el polvo sin sintetizar quede atrapado entre capas, para disipar la energía y sobre todo para prevenir que estructuras demasiado sobresalientes se hundan. Deben ser diseñados de forma que cumplan estas funciones y además sean fáciles de retirar en los procedimientos de post-procesado.
- En piezas huecas ya fabricadas aparece la complicación de eliminar el polvo de material sobrante. Se debe tener en cuenta, en el diseño estructural, la creación de canales y orificios para evitar esta acumulación.

Las condiciones que presenta la impresión 3D de libertad de diseño, unidas a los avances de herramientas informáticas especializadas, son ideales para enfocar el concepto de optimización. En un proceso general de fabricación, la optimización es un aspecto clave para conseguir los mejores resultados y beneficios posibles. Aumenta la calidad del diseño, la eficiencia y el rendimiento del proceso en todos los aspectos. Se cree en el principio de que cuanto más elaborado y detallado es un diseño, mejor cumplirá con su objetivo y tendrá un valor añadido mayor [2].

Las nuevas herramientas software de simulación, basadas en métodos de elementos finitos, permiten predecir el comportamiento de un modelo a partir de las solicitaciones a las que se ve sometido. Buscan optimizar el material de la pieza mediante variaciones en su geometría. Sus principios de cálculo se basan en analizar las regiones de la pieza más cargadas, para redistribuir la cantidad de material necesario a las zonas que necesitan refuerzo para soportar los esfuerzos aplicados. Esto puede adaptarse a distintos comportamientos de la pieza y distintos materiales.

Los diseñadores se centran en los aspectos importantes de la fabricación, sacando partido de las limitaciones y capacidades de la impresión 3D para conseguir los mejores resultados. Con este objetivo se suele utilizar una metodología de optimización basada en cuatro pasos fundamentales [3]:

1. Análisis de las especificaciones de la pieza: su volumen, sus caras útiles, su interacción con otras piezas, su comportamiento ante uniones o cargas, etc. También son factores importantes a tener en cuenta el material de fabricación y sus post-procesos correspondientes.
2. A continuación se generan uno o varios modelos base, a partir de dichas especificaciones y la experiencia del diseñador. Una posibilidad es crear estos modelos automáticamente a partir de herramientas CAD de optimización topológica. Se empieza definiendo las superficies de contacto o trabajantes, que deben cumplir con sus especificaciones. A partir de aquí el diseñador ya puede generar formas adaptables y elegir las secciones y el uso de la celosía estructural adecuada. Es muy importante no olvidar los radios de acuerdo y suavizar las formas, para que se mantenga una velocidad constante en la boquilla, y diseños de piezas huecas con cavidades que faciliten el vaciado de polvo.
3. Se aplican a los modelos base una serie de parámetros y restricciones de fabricación, con límites establecidos, para modificar su geometría respetando las especificaciones originales. En estos parámetros, además de los geométricos, también se pueden incluir aspectos como la duración del proceso, el consumo de materia prima y el coste global, que están vinculados al volumen total de pieza. Por eso, normalmente, un diseño optimizado está basado en minimizar el volumen respetando el comportamiento mecánico especificado. Tras varios ensayos y rediseños (mediante herramientas CAD y análisis de elementos finitos) se puede aproximar a una forma lo más óptima posible.
4. Para finalizar se procede a una validación del modelo optimizado. Esto se puede conseguir con análisis virtuales por elementos finitos, aunque en la actualidad lo más efectivo es proceder a la fabricación real piezas o, en su caso, prototipos que se someten a una serie de mediciones de comprobación de la estructura. Con esto se puede evaluar la capacidad de fabricación y definir, cuando es necesario, la posición, cantidad y tamaño de los soportes, y la orientación ideal de la pieza, para reducir al mínimo la superficie de apoyo. Toda esta información obtenida debe ser analizada y utilizada para actualizar los parámetros de fabricación definidos en un principio.

Una aproximación a estos pasos se va a llevar a cabo en el presente estudio, para poder optimizar adecuadamente la pieza escogida.

1.2. FABRICACIÓN ADITIVA

Una nueva tecnología de fabricación está en auge en la actualidad, y se está desarrollando con una rapidez y avances desmesurados, debido a los progresos que aporta. Esta tecnología es la fabricación aditiva o también llamada impresión en 3D. Se basa en la fabricación de productos con geometrías complejas a partir de una geometría CAD 3D, mediante la sucesiva adición de capas de material.

Estas nuevas tecnologías surgen a finales de los años 80, aprovechando el progreso de la era digital, y dando un giro radical a los conceptos de fabricación convencionales. Se pasa a fabricar por deposición

controlada de material, por capas, hasta conseguir la forma deseada, dejando aparte los métodos convencionales de arranque de material y utilización de utillaje o moldes. El objetivo era fabricar rápidamente prototipos de piezas para su validación (Rapid Prototyping), pero esta visión pronto cambió, dirigiéndose hacia la fabricación de producto final.

Cualquier sector puede salir beneficiado por las infinitas posibilidades que ofrece esta tecnología. El éxito de estos métodos de fabricación radica en una serie de ventajas:

- No necesitan utillajes ni moldes, y además no tienen limitaciones geométricas de fabricación debidas a los mismos, como ángulos de desmoldeo, agujeros con trayectoria curva o golpes de la herramienta de mecanizado con piezas de geometría compleja.
- Aumenta el valor añadido de los productos fabricados mediante estas técnicas.
- Capacidad de generar geometrías complejas (espesores variables, canales internos, vaciados,...), e incluir modificaciones en la pieza sin dificultad, directamente en el CAD 3D. Posibilidad de personalizar las piezas, en su forma y en su peso, para una función determinada.
- A penas se producen residuos ni sobrantes de material, y en algunos casos incluso el polvo sobrante se pueden reutilizar. Se intenta cumplir con el compromiso de sostenibilidad en la fabricación.
- Piezas fabricadas con varios materiales distintos, consiguiendo propiedades mejoradas (peso, resistencia) o abaratando el producto.
- Tiempos en el proceso de fabricación se reducen considerablemente.
- Se pueden fabricar conjuntos de piezas (mecanismos, piezas dentro de otras) directamente, ahorrándose el montaje y ajuste de los distintos elementos.
- Respecto al punto de vista de la producción industrial se destaca:
 - El tiempo total de producción de un nuevo producto, desde que es concebido hasta que llega a las tiendas, se reduce, y además permite una gran flexibilidad ante los cambios de la demanda.
 - El tamaño del lote producido puede ser totalmente variable (incluso de una unidad si se diera el caso).
 - Se reducen los errores y costes por montaje, ya que mediante la fabricación aditiva se pueden fabricar conjuntos ya ensamblados.
 - Los costes relacionados con el utillaje (inversión de compra, fabricación, tiempos de cambio de herramienta y mantenimiento...) se reducen considerablemente.
 - Se pueden combinar procesos de fabricación aditiva con fabricación convencional, aprovechando las ventajas que da cada uno y obteniendo productos de alto valor o con capacidades especiales.
 - El tamaño de stock, y su consiguiente espacio de almacenamiento necesario, se reduce, incluso en algunos casos a cero, debido a la posibilidad de fabricar bajo pedido gracias a la rapidez de fabricación.

A parte de todas estas ventajas, las técnicas de fabricación aditiva tienen una serie de inconvenientes que cabe mencionar:

- En superficies curvas aparece el llamado “efecto escalera”: Cuando se fabrica en capas, las superficies curvas no quedan igualadas, aparecen rugosidades debidas a la diferencia entre

las capas. Esto implica que agujeros y curvas con cierta inclinación deben ser fabricadas en planta o con soportes (dependiendo del método de fabricación aditiva) para que tengan formas aceptables.

- Algunas veces, dependiendo del método, el proceso de fabricación es lento, lo que conlleva que la utilización de estos métodos sólo sea aceptable para series de producción pequeñas.
- La fabricación en capas produce materiales anisotrópicos, lo que puede acarrear problemas en piezas con altas solicitaciones, haciendo que su comportamiento ante esfuerzos no sea el adecuado.
- Las tolerancias en fabricación aditiva, en casi todos los métodos, siguen siendo mayores que las de métodos de fabricación convencional.

Uno de los problemas al que se enfrenta la fabricación aditiva es la falta de normativa aplicable. El gran avance de este tipo de tecnologías demanda una normativa estándar y global, tanto en Europa como en el resto del mundo, que permita su uso en procesos generales para fabricación de productos finales. Actualmente el interés de grandes empresas y comunidades profesionales de todo el mundo es creciente y se está avanzando en este aspecto. Está en proceso una estandarización de terminología, ensayos, materiales y especificaciones de proceso, por parte del Comité ASTM Internacional o el comité técnico ISO, entre otros [16].

1.2.1. Tipos de fabricación aditiva

La fabricación aditiva se ha desarrollado en distintas variantes, y en este apartado se van a mencionar las más destacables, explicando brevemente su metodología y características principales. Se pueden clasificar según el estado del material base utilizado en el proceso: líquido, sólido o en polvo [15].

- Material en base líquida:
 - **Solidificación de Resina o Estereolitografía (SLA):** El material se solidifica punto a punto debido a la fotopolimerización mediante un láser ultravioleta sobre una sección 2D del modelo (plano XY). La plataforma va descendiendo (en el plano Z) en pequeños incrementos según la altura de la capa definida. Un mecanismo esparce una nueva capa de resina líquida para la siguiente solidificación. Una vez que la pieza se ha completado, se sumerge en un baño químico para su limpieza y retirada de exceso de resina, y después se cura en un horno. Este método proporciona un espesor de capa de entre 0,05 y 0,2 mm, con una precisión es de $\pm 0.2\%$. Los materiales utilizados son fotopolímeros y resinas epoxi-acrílicas, y algunos de los tipos comerciales son PP flexible, Protogen, Water Clear ABS, Accura® Xtreme, Poly1500, NeXt, Trusk y Trusk Solid.

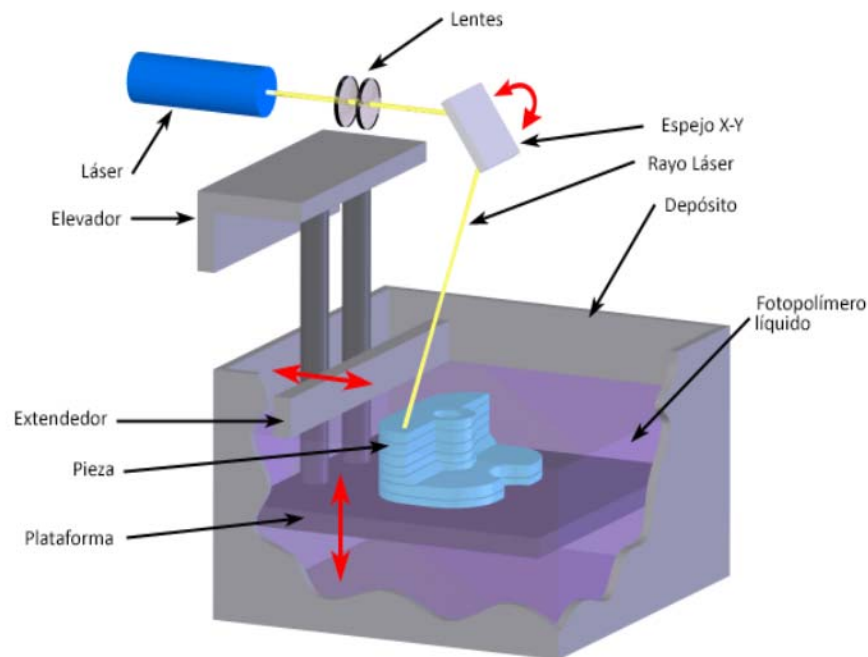


Figura 1.1. Esquema de Estereolitografía (SLA).

- **Fotopolimerización por Luz Ultravioleta (Solid Ground Curing, SGC):** La sección 2D del modelo se sitúa encima de la resina para exponerla a la luz ultravioleta. Se elimina el polímero que no ha solidificado y se seca mediante aire, reutilizando la resina no solidificada. A continuación se rellenan los huecos dejados en el secado con cera caliente (70C°), cuya función será de estructura de apoyo. Se solidifica la cera y se rectifica el espesor y acabados exactos. El espesor de capa mínimo es de 0,06 mm, y los materiales utilizados tienen propiedades similares a los del SLA, fotopolímeros y resinas fotosensibles.
 - **Inyección (proyección) de Resina y Fotopolimerización por Luz Ultravioleta (PolyJet):** Un cabezal con miles de inyectores deposita en la bandeja de construcción gotas de resina líquida que se curan mediante dos lámparas de rayos UV situadas en los laterales del mismo cabezal. Se puede trabajar con dos materiales simultáneamente (piezas bimaternal). El espesor mínimo de capa es de 0.017 mm. La gama de materiales es muy amplia, desde resinas traslúcidas, polipropileno, ABS o resinas elásticas.
- **Materiales en base polvo:**
 - **Sinterización Selectiva por Láser (SLS):** Se deposita una capa de polvo, un láser de CO₂ lo sinteriza en los puntos seleccionados de una sección 2D del modelo (plano XY): La plataforma va descendiendo (plano Z) en pequeños incrementos según la altura de la capa definida. La precisión es de $\pm 0,3\%$ (min $\pm 0,3$ mm), y el espesor de capa mínimo es de 0,06 mm. Los materiales típicos más utilizados en este método son Polyamide (PA), Alumide, PA2241 FR, Glass filled polyamide (PA-GF) y TPU 92A-1.

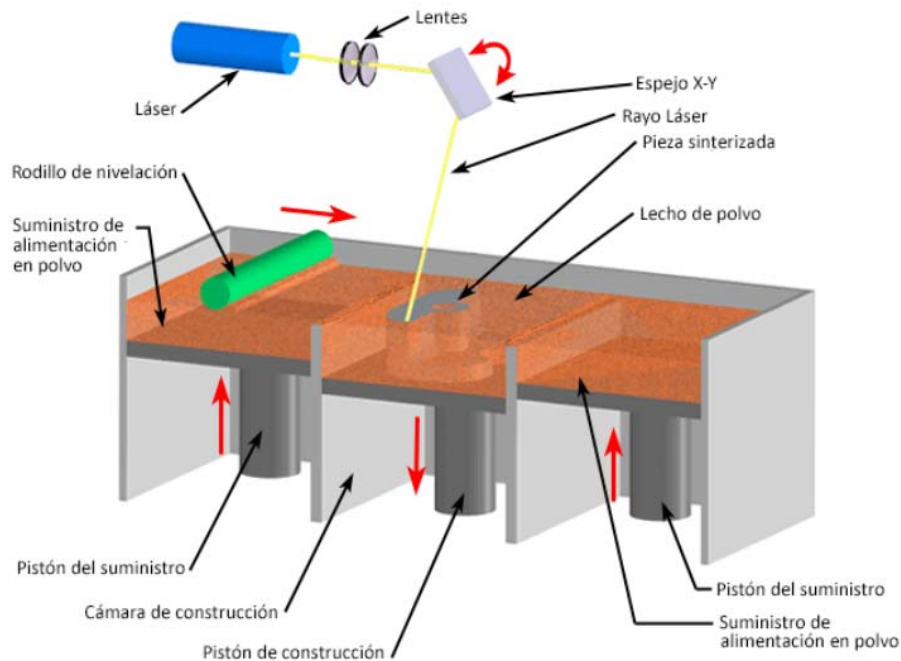


Figura 1.2. Esquema de Sinterización Selectiva por Láser (SLS)

- **Impresión 3D - Proyección por Aglutinante (3DP Three Dimensional Printing):** El modelo se construye sobre una cubeta rellena de material en polvo. Un cabezal inyecta un aglutinante sobre la superficie de la cubeta, uniéndolo según la geometría de la sección 2D del modelo. La adición y nivelación del polvo se realiza mediante un rodillo. Finalizado el proceso, se aspira el polvo sobrante de la cubeta hasta que la pieza queda limpia. No se necesitan soportes externos ya que el polvo de la cubeta sirve de apoyo a voladizos. Posteriormente hay que curar la pieza con distintos recubrimientos. En este caso el espesor mínimo de capa es de 0,013 a 0,076 mm. El material puede ser, cerámica, metal y polímeros.

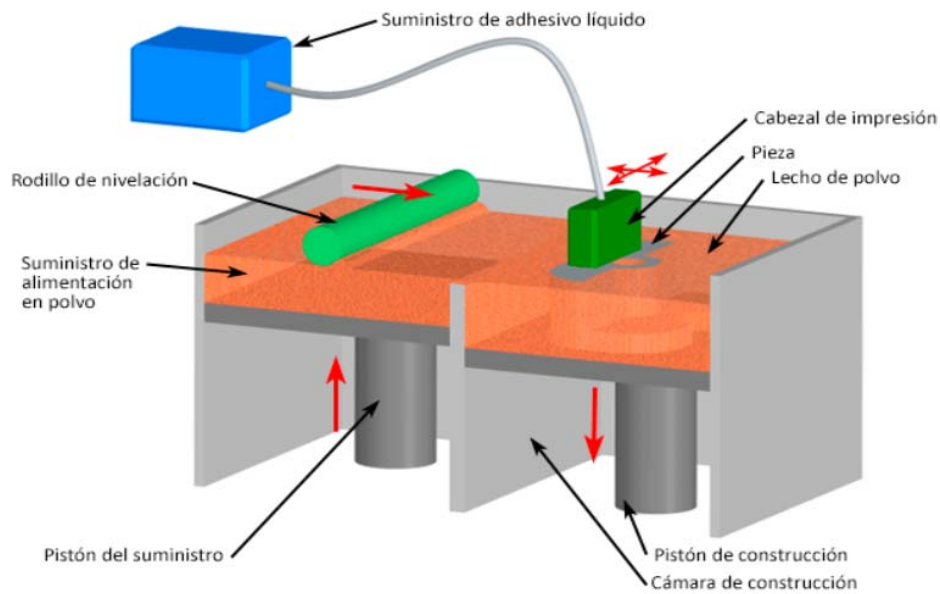


Figura 1.3. Esquema de Impresora 3D (SLS)

- **Fusión por Haz de Electrones (Electron Beam Melting, EBM):** Se utiliza un chorro de electrones emitido desde un filamento de tungsteno (pistola) que se encuentra a 60 kV de tensión. La intensidad de corriente del chorro varía de 0 a 50 mA, debido al empleo de una serie de bobinas situadas entre la pistola y la cámara de fabricación, que enfocan, dirigen y regulan la intensidad. Dispone de 3000 W de potencia para fundir el material. La cámara de fabricación está al vacío para obtener piezas con mayor pureza. Las estructuras de soporte están realizadas del mismo material que el modelo y requieren un proceso posterior de acabado, incluso un mecanizado posterior. El espesor mínimo de capa es de 0,05 mm, y se consiguen piezas de más del 99,9% de densidad. Los materiales utilizados son metales: acero, titanio, aleaciones no férricas, etc.

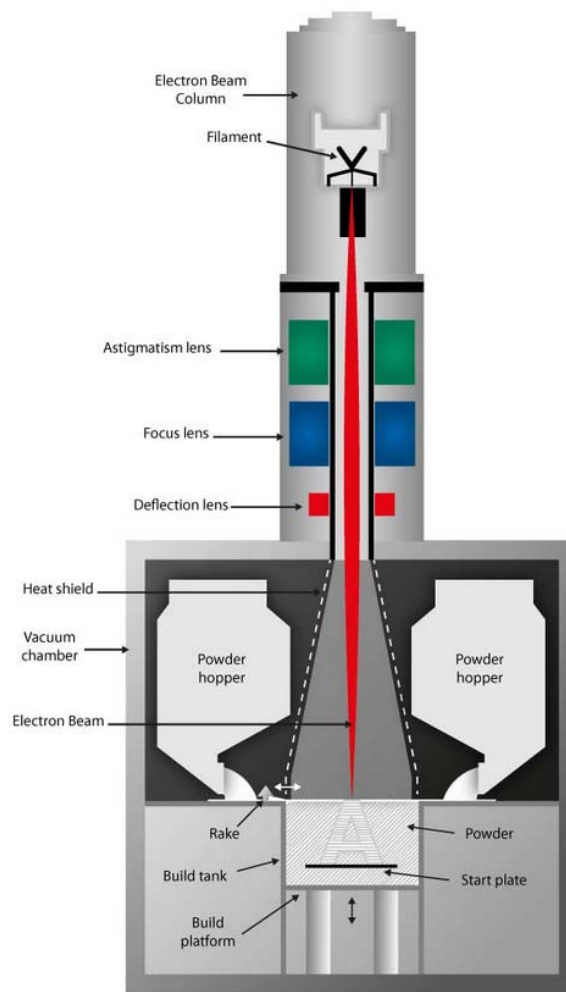


Figura 1.4. Esquema de Fusión por Haz de Electrones (EBM)

- **Fusión Selectiva por Láser (Selective Laser Melting - SLM o Direct Metal Laser Sintering – DMLS):** El cabezal de impresión dispone de un láser de CO₂ que es orientado a través de un conjunto de lentes sobre el material en polvo. Las estructuras de soporte están realizadas en el mismo material que el modelo y requieren un proceso posterior de acabado, y un posible mecanizado de la pieza posteriormente. El espesor mínimo de capa es de 0,020 mm, y el material puede ser acero inoxidable, Co-Cr, Inconel 625 – 718, titanio Ti64, etc.
- **Materiales en base sólida:**
 - **Deposición de Hilo Fundido (Fused Deposition Modeling, FDM):** La deposición del hilo enrollado en una bobina, se realiza a través de la boquilla de un cabezal térmico que se desplaza según el plano (XY). La plataforma va descendiendo (plano Z) en pequeños incrementos según la altura de la capa definida. El espesor de capa es 0,13 – 0,25 mm (para ABS); 0,18 – 0,25 mm (para ABSi); y 0,25 mm (para PPSU). Pueden

utilizarse los siguientes materiales termoplásticos: ABS, ABSi, ABS-M30, ABS-ES07, PC-ABS, PC-ISO, ULTEM 9085.

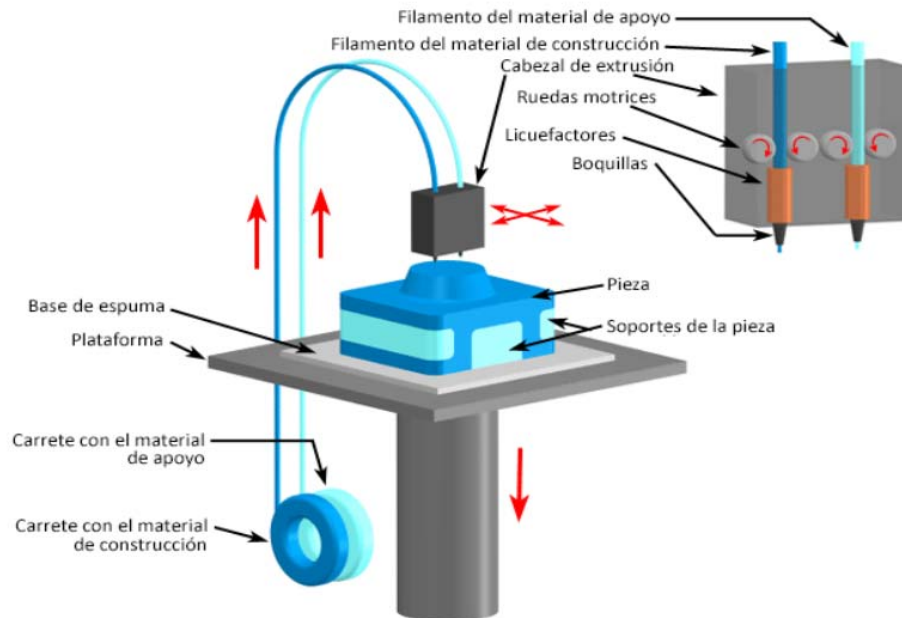


Figura 1.5. Esquema de Máquina de Deposición de Hilo Fundido (FDM)

- o **Deposición por Laminación Selectiva (Selective Deposition Lamination, SDL) o impresión 3D en papel:** Inventada por el Dr. MacCormack, SDL no se debe confundir con la tecnología de fabricación de objetivos por laminación (LOM). LOM utiliza un láser, papel laminado y un adhesivo que fija el material de modelo y de soporte. En SDL se utiliza un adhesivo que se deposita en la zona requerida, tanto del modelo como del soporte, y una cuchilla que corta el contorno de la capa. Para el LOM el espesor de capa es de 0,165 mm y para el SDL es el que corresponde al espesor del papel utilizado más la capa de adhesivo. En LOM se utilizan hojas de PVC, mientras que en SDL es papel.

Las tecnologías de fabricación aditiva se encuentran en los inicios de un proceso de expansión dentro de sector de la fabricación, y variadas sus aplicaciones pueden conllevar grandes ventajas competitivas. Son muy diversas las tecnologías que permiten fabricar piezas por este principio, constituyendo así una nueva revolución en la industria.

1.2.2. Aplicaciones y sectores de incidencia

La fabricación aditiva se emplea actualmente y tiene un crecimiento en muchos sectores [4] [5]. Se puede ver su porcentaje aproximado en el gráfico de la Figura 1.6:

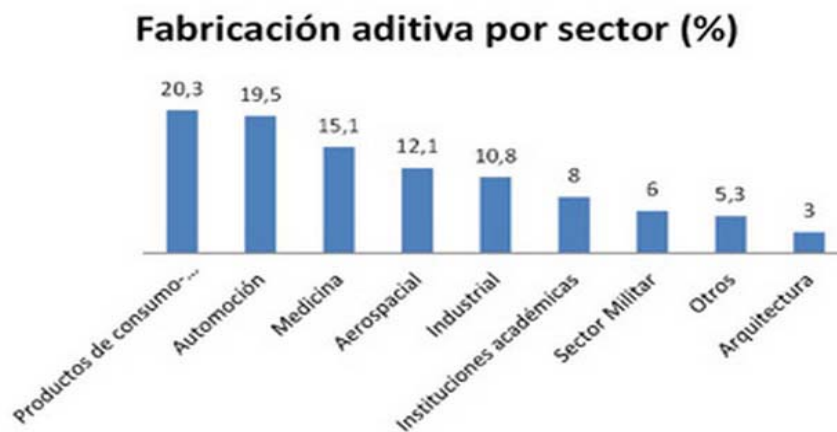


Figura 1.6. Incidencia de la fabricación aditiva en los diferentes sectores (Wohlers Report 2012)

- Sector de la automoción:** La principal aplicación de la FA en este sector es la creación de prototipos que permitan la validación de procesos de ingeniería y diseño para los modelos nuevos que se pretenden sacar al mercado. Este tipo de fabricación permite a los diseñadores conseguir prototipos con casi cualquier forma y propiedad física, de forma rápida y con bajos costes. Otras aplicaciones son la fabricación de moldes de inyección, y fabricación de piezas especiales para personalizar vehículos particulares de alta gama o para competición, como la Fórmula 1. Se espera que un futuro próximo, con la evolución de los materiales y las máquinas de FA, aumente el uso de estas técnicas cumpliendo con las exigencias de tolerancias, acabados y productividad. Algunos de los fabricantes que ya utilizan estas técnicas son Mazda, Citroën o Renault.
- Sector médico y dental:** Es uno de los sectores con más aplicación de productos fabricados con la FA, según se puede comprobar en la gráfica de la Figura 1.6. Las grandes ventajas que proporciona la FA en este sector son: capacidad de crear modelos adaptados a las circunstancias específicas de cada paciente, aunque sean piezas complejas adaptadas al cuerpo humano; esto se consigue en menor tiempo y coste que los métodos convencionales de fabricación; además, la similitud entre los métodos de captura de datos médicos (tacs y escaneados 3D) y los ficheros necesarios para la FA facilita el proceso considerablemente. Las principales aplicaciones son: biomodelos o reproducciones de partes del cuerpo de pacientes para facilitar el trabajo de preoperatorio de médicos y cirujanos; implantes y prótesis personalizados (dentales, de articulaciones, de oído...); scaffolds o andamiajes, estructuras porosas que permiten el crecimiento de tejidos artificiales; plantillas y guías quirúrgicas y otras herramientas para intervenciones.
- Sector aeroespacial:** Es otro de los sectores en los que más se demanda los progresos que ofrece la FA y más interés se ha puesto en su desarrollo. Las ventajas más importantes que puede aportar a este sector son sobre todo la capacidad de fabricar piezas complejas o personalizadas, de materiales variados (tanto polímeros como metales) y en pequeñas series; poder aligerar su peso sin comprometer sus capacidades mecánicas, mejorando el índice buy-to-fly y reduciendo pérdidas de materiales de fabricación. Actualmente se emplea esta tecnología para piezas de poca sollicitación (botones, conductos, etc) y utillajes, pero la gran mayoría de los fabricantes aeronáuticos están invirtiendo para que su futuro uso generalizado sea posible. Uno de los inconvenientes que se presentan es la necesidad de una normativa precisa de homologación y fabricación, una tarea que está pendiente pero en proceso.

- **Sector de productos de consumo y electrónicos:** los diseñadores buscan en la fabricación aditiva la capacidad de personalización, libertad y rapidez de diseño que actualmente demanda la sociedad en todos los productos de consumo. Además les aporta la gran ventaja del uso de una sola máquina para el diseño, prototipado y fabricación de un producto acabado. Hay una gran gama de productos que actualmente se fabrican mediante estos métodos, como son juguetes, muebles y artículos para el hogar, equipamiento deportivo, joyas o diseños de moda. Uno de los objetivos que se espera lograr en un futuro es el procesamiento y fabricación de textiles y calzado en gran escala mediante fabricación aditiva. En cuanto a los componentes y dispositivo electrónicos, mediante la fabricación aditiva se pueden imprimir componentes pasivos básicos (como resistencias, diodos o bobinas), e incluso interconexiones de circuito, mediante la deposición de materiales conductores. Esto puede suponer una revolución en el proceso general de creación de estos elementos.
- **Nuevos sectores económicos:** Con este nuevo concepto de fabricación han aparecido nuevos mercados emergentes, como por ejemplo la creación de avatares personalizados o esculturas de personas previamente escaneadas. El concepto de fábrica ha evolucionado, ya que la tecnología de fabricación aditiva permite fabricar piezas en lugares en los que en principio no se dispone de infraestructura, desde una casa particular, una expedición militar en el desierto o un buque en alta mar. Esta nueva fábrica da menos importancia a los activos físicos (herramientas y moldes) y se basa más en los activos digitales (como el software).

2. DEFINICIÓN DEL ESTUDIO

2.1. PIEZA A OPTIMIZAR

Como se ha mencionado en el apartado 1.2.2, la industria aeronáutica siempre está en continuo desarrollo, buscando mejoras en el diseño y el desempeño aerodinámico de los aviones. Uno de los objetivos primordiales en este sector es la reducción de pesos en el armazón de la aeronave, lo que conlleva un menor consumo de combustible. Este hecho, además de implicar una disminución considerable de gases contaminantes expulsados a la atmósfera, que desde el punto de vista medioambiental es esencial, también ayuda al mantenimiento de los motores, alargando su vida útil. Además destaca la importancia de los costes: a menor cantidad de combustible utilizado, más se reduce el coste del vuelo.

Con este propósito de reducción de peso, el sector aeronáutico está invirtiendo en numerosas investigaciones relacionadas con materiales más livianos y nuevos avances tecnológicos de fabricación. Una de las ideas que ha presentado más potencial de futuro es la tecnología de fabricación aditiva.

Estos objetivos han impulsado la creación del presente estudio, en el que se pretende rediseñar una pieza real con función aeronáutica para adaptarla a su fabricación aditiva, realizando una optimización topológica que pueda cumplir los objetivos buscados de reducción de peso, reducción de costes, forma adaptada y rapidez de fabricación.

El método de fabricación que se ha considerado para el estudio es el EBM (Electron Beam Melting). Ha sido elegido debido a su capacidad de fabricar en gran variedad de metales (entre ellos la aleación de la pieza a analizar) y sus buenos acabados estructurales y bajas porosidades, gracias a sus altas temperaturas de fabricación en ambiente cerrado. Uno de los fabricantes más importantes de esta tecnología, y creador de la misma, es la empresa ARCAM [14], por lo que para el estudio se tendrán en cuenta la información proporcionada por este fabricante en cuestión de maquinaria, producción y materiales.

Para el estudio se ha escogido una pieza que forma parte de la estructura de una aeronave comercial, y que tiene ciertas solicitaciones. Está incluido en el conjunto de sujeción del sistema de toma de aire del APU (Unidad Auxiliar de Potencia), dentro de la sección 19.1 del avión. Es un herraje macho metálico, ensamblado al fuselaje mediante un bulón y una barra móvil. El herraje original se puede observar en la Figura 2.1 (modelo en CAD). El Anexo 3 presenta las vistas ortogonales y medidas de las dos piezas más importantes que forman parte de la unión, el herraje macho y el herraje hembra.

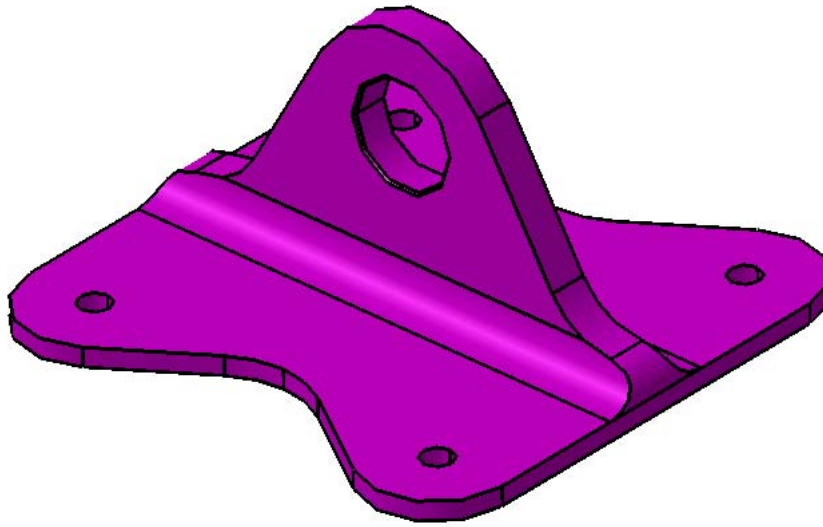


Figura 2.1. Herraje para optimización topológica, objetivo en el presente estudio.

Las razones principales por las que se ha elegido esta pieza son:

- Tiene una forma básica que facilita el análisis de diferentes modelos de partida y da la posibilidad de proporcionar resultados más variados.
- Este herraje está presente en la estructura del avión en distintos sistemas de anclaje, con lo que sería realista estudiar varios casos de carga distintos, tanto verticales, transversales u oblicuos.
- Su material de fabricación inicial (Ti-6Al-4V) es muy versátil, y uno de los más utilizados para la fabricación con EBM en la industria en general.
- Forma parte de una estructura aeronáutica, sector en el que siempre se busca la reducción de peso para aligerar las cargas de vuelo, con lo que los resultados de este estudio pueden ser útiles y aplicables al caso real.
- Se dispone de un modelo CAD de la pieza original, lo que facilita el análisis.

Esta pieza está fabricada actualmente de forma convencional mediante fundición y mecanizado con aleación de Titanio Ti-6Al-4V (Ver [7], Tabla 5.4.1.0(g)). Sin embargo para fabricación aditiva, este material tiene propiedades distintas, debido al proceso de sinterizado. Tanto para el material convencional como para el específico de fabricación aditiva, sus propiedades físicas y mecánicas vienen representadas en la Tabla 1:

Material	E (GPa)	Nu (v)	ρ (Kg/m ³)	F _{ty} (MPa)	F _{tu} (MPa)	F _{su} (MPa)	F _{bru} (MPa)
Ti-6Al-4V AMS 4992	116,5	---	4428,8	765,32	861,84	592,94	1385,85
Ti-6Al-4V Arcam	120	0,295	4425	868	942	592,94	1385,85

Donde:

E es el módulo elástico

ν es el coeficiente de Poisson

ρ es la densidad

F_{ty} es la tensión a fluencia

F_{tu} es la resistencia a tracción

F_{su} es la resistencia a la cortadura

F_{bru} es la resistencia a aplastamiento

Tabla 1. Propiedades de los materiales fabricables, Ti-6Al-4V AMS 4992 y Ti-6Al-4V Arcam.

La masa de este herraje, medida con la herramienta INSPIRE® y considerando la densidad de su material original, es de 127,3 gr.

Las resistencias a cortadura y aplastamiento del material Arcam no se conocen, ya que son propiedades obtenidas por métodos empíricos, no proporcionados por el fabricante. Sin embargo, se han tomado los valores de la aleación Ti-6Al-4V convencional ya que se suponen valores similares para el Ti-6Al-4V Arcam, y son necesarios para futuros cálculos (Cálculo de la carga aplicada aproximada, Anexo 1).

Estos dos materiales están sometidos a un post procesado HIP (Hot Isostatic Pressing) que se basa en la exposición de la pieza a unos rangos elevados de temperatura y presión para alterar su microestructura, sus propiedades mecánicas y mejorar su aspecto superficial, reduciendo la porosidad. En este caso, los parámetros utilizados para el proceso son una temperatura de 920 °C y presión de 100 MPa durante 120 minutos, según normativa SAE AMS 4992.

Este herraje va acoplado a la estructura de la aeronave mediante cuatro remaches HI-LOK DAN7-6 (diámetro de 4,8 mm), también fabricados en Ti-6Al-4V, y sus correspondientes tuercas y arandelas de seguridad.

El objetivo de este estudio, que se llevará a cabo en los posteriores apartados, es rediseñar el herraje descrito para adaptar su fabricación a la impresión 3D, optimizando su forma y reduciendo su masa en un porcentaje considerable, pero sin que se vea alterada su resistencia a las sollicitaciones que experimenta en montaje. En definitiva, mejorar todos los aspectos relacionados con la pieza.

El sistema adoptado para conseguir la optimización de la pieza requiere de varios pasos. Primero se crean varios modelos en un programa específico de optimización topológica, para simular la pieza original. A estos modelos se les aplican las cargas y restricciones reales de la pieza, y se ejecuta la optimización en el programa. Los resultados se afinan y perfeccionan para su fabricación, y se elige el modelo que mejores resultados proporcione. Para finalizar se compara el modelo optimizado con la pieza original, analizando los resultados en cuestión de peso, tiempos de fabricación y metodología del proceso.

3. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

3.1. SOLIDTHINKING INSPIRE®

SolidThinking Inspire® es una aplicación informática que permite a los ingenieros de diseño, diseñadores de productos y arquitectos, crear e investigar conceptos estructuralmente eficientes, rápida y fácilmente [17].

Las simulaciones estructurales tradicionales permiten a los ingenieros comprobar si un diseño soportará las cargas requeridas. Inspire mejora este proceso, mediante la generación de un nuevo diseño, redistribuyendo el material dentro de un espacio determinado, situándolo sólo “donde se necesita” y utilizando las cargas como una entrada.

El software es fácil de aprender, y trabaja con las herramientas existentes de CAD para ayudar a diseñar piezas estructurales correctamente desde la primera vez, reduciendo drásticamente costes, tiempo de desarrollo, consumo de material y peso del producto.

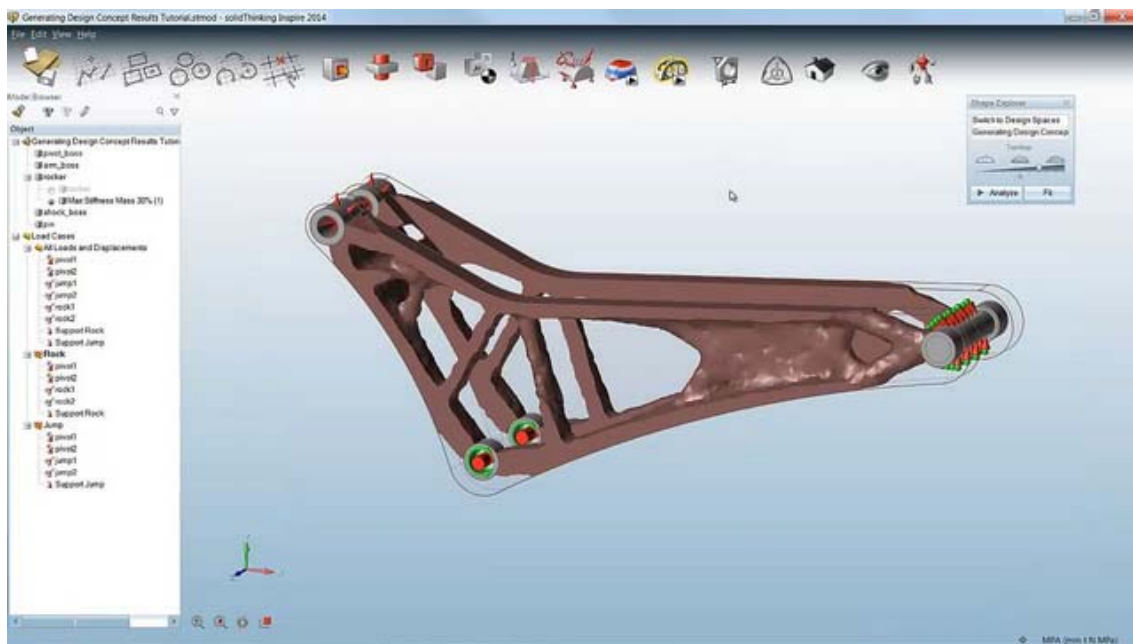


Figura 3.1. Interfaz gráfica del software Inspire

Las últimas versiones de Inspire presentan múltiples posibilidades, incluyendo:

- Instrumentos de simplificación de geometría.
- Opciones de suavizado.
- Análisis estático lineal.
- Masas concentradas

El proceso de optimización que sigue Inspire es sencillo: Una vez definido el espacio de diseño en el modelo, se aplican las cargas y las restricciones, y activando la acción de optimización, en pocos minutos se consigue el componente optimizado.

Las principales opciones que proporciona Inspire vienen presentadas en la Figura 3.2, tal cual se pueden encontrar en la barra principal de herramientas de la interfaz del programa:

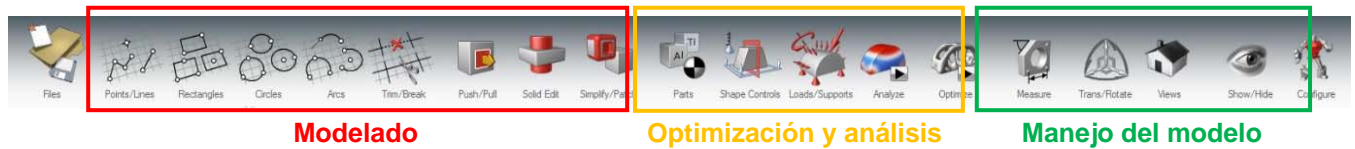


Figura 3.2. Barra de herramientas principal del software Inspire

Destacan tres grupos principales de acciones que se pueden aplicar:

- Modelado: el programa posee varias herramientas para la creación del modelo, opciones de boceto, extrusión, agujeros, simplificación y edición del sólido.
- Optimización y análisis: Además de las acciones de optimización y análisis, en este grupo hay iconos que permiten acceder a una biblioteca de materiales (o crear uno propio), definir los distintos casos de carga (cargas y soportes) y aplicar controles de forma (como simetrías o desplazamientos).
- Manejo del modelo: Entre estas opciones se puede encontrar acciones de medir, cambio de vista, trasladar o rotar el modelo o visualizar/ocultar distintas partes.

Inspire permite importar y exportar los modelos creados para poder utilizarlos en otras herramientas de CAD habituales, ya que soporta los formatos típicos más importantes, como por ejemplo .igs, .iges, .step o .stl.

Inspire es una herramienta muy versátil que ya está siendo utilizada por gran cantidad de empresas de varios sectores, como automoción, aeroespacial y telefonía entre otros.

Método de optimización:

INSPIRE® trabaja en su trasfondo recurriendo a herramientas de cálculo del programa OptiStruct [11], que resuelve los problemas de optimización topológica basándose en el método de la densidad, también conocido como método SIMP (Solid Isotropic Material with Penalty).

Con el método de densidad, la densidad del material de cada elemento se utiliza directamente como la variable de diseño, y varía continuamente entre 0 y 1; estos representan el estado de vacío y sólido, respectivamente. Los valores intermedios de densidad representan el material ficticio. La rigidez del material se supone que es linealmente dependiente de la densidad. Esta formulación de la materia es consistente con nuestra comprensión de las materias comunes. Por ejemplo, el acero, que es más denso que el aluminio, es más fuerte que el aluminio. Siguiendo esta lógica, la representación del material ficticio a densidades intermedias sí refleja intuiciones de ingeniería.

En general, la solución óptima de los problemas implica grandes áreas grises de densidades intermedias en el dominio estructural. Estas soluciones no tienen ningún significado físico real cuando se está buscando una topología de un material dado, y no es significativo cuando se considera el uso de materiales diferentes dentro del espacio de diseño. Por lo tanto, ciertas técnicas tienen que ser introducidas para penalizar las densidades intermedias y forzar que el diseño final sea representado por densidades de 0 o 1 para cada elemento. La técnica de penalización utilizada es "la ley de representación de propiedades de elasticidad", que se pueden expresar para cualquier elemento 3D o 2D con la siguiente fórmula:

$$\underline{K}(\rho) = \rho^p \cdot K$$

Donde

\underline{K} es la matriz de rigidez penalizada de un elemento

K es la matriz de rigidez real de un elemento.

ρ es la densidad

p es el factor de penalización (siempre mayor que 1, y toma valor por defecto de 3 cuando no existen restricciones de fabricación)

3.2. CATIA

CATIA es un conocido software informático de ingeniería y diseño en 3D asistido por ordenador. Está comercializada por Dassault Systèmes [18] y es ampliamente utilizada por empresas de todo el mundo relacionadas con el sector de la industria aeronáutica y del automóvil, y expandiéndose continuamente a más sectores.

Este programa está diseñado para proporcionar apoyo desde la concepción del diseño hasta la producción y el análisis de productos. Aporta grandes ventajas y facilidades al diseñador e ingeniero en muchos aspectos:

- Diseño mecánico: concede al usuario la capacidad de cubrir sus necesidades de diseño con formas y superficies complejas, pudiendo trabajar con piezas sólidas, chapas, conjuntos de ensamblaje o planos.
- Ingeniería y optimización del proceso: permite generar modelos 3D y prototipos virtuales, con los que simular y analizar el producto real y así conseguir mejor calidad y rendimiento del mismo. Los modelos 3D se pueden crear desde cero o a partir de bocetos en 2D.
- Cubre una extensa gama de operaciones como el diseño y el posicionamiento de componentes, la creación de automatismos, las tolerancias funcionales y anotaciones, la simulación de la cinemática en tiempo real, la generación de esquemas de ensamblaje y la creación de imágenes fotorrealistas.
- Recursos: Esta herramienta posee una amplia biblioteca de materiales, herramientas, guías, incluso una interfaz de programación de aplicaciones, todo para facilitar el trabajo del ingeniero durante todo el desarrollo del producto. Además se puede personalizar su interfaz, ordenando y visualizando los comandos como el usuario encuentre más conveniente, para simplificar su trabajo.
- Tiene capacidad para infinidad de procesos relacionados con el diseño eléctrico y electrónico, ingeniería de tuberías, diseño de herramientas.
- Es capaz de leer archivos de varios formatos (.step, .iges...) que le proporciona una gran versatilidad.

En el presente estudio, esta herramienta se ha utilizado como ayuda al diseño y la optimización. Se ha aprovechado su conocimiento para suavizar las formas de los modelos optimizados conseguidos mediante la herramienta INSPIRE (en formato .iges), y se han transformado hasta tener un aspecto más definido y un perfil más ajustado.

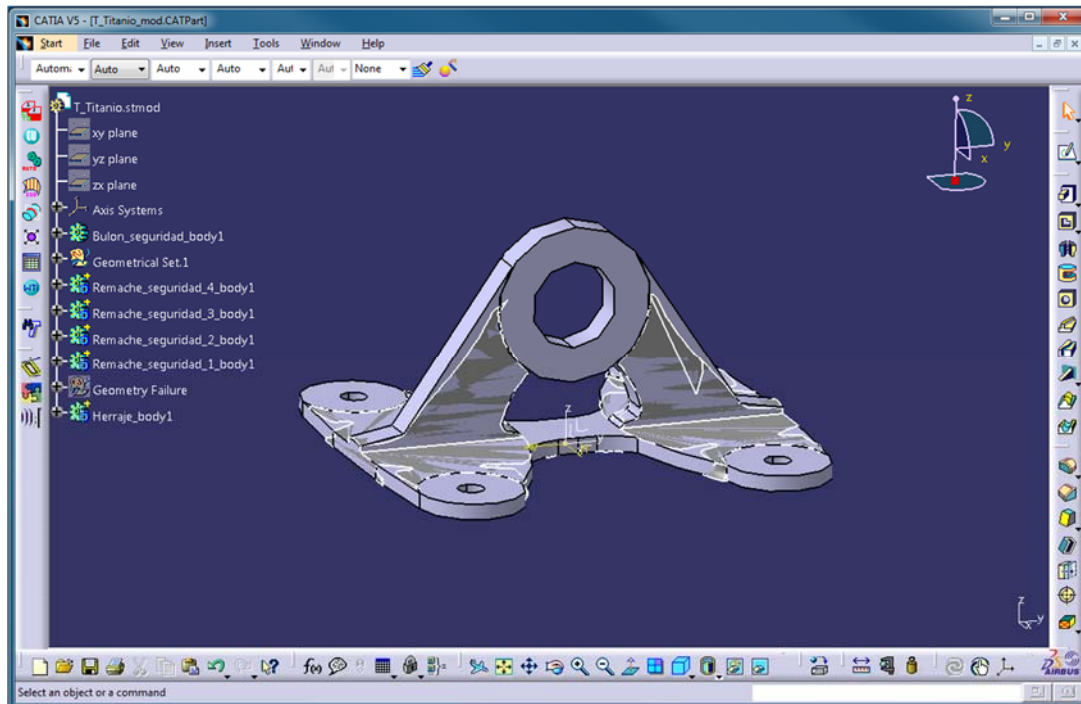


Figura 3.3. Ejemplo de interfaz del programa CATIA

4. DISEÑO OPTIMIZADO

4.1. MODELOS PRE-OPTIMIZACIÓN

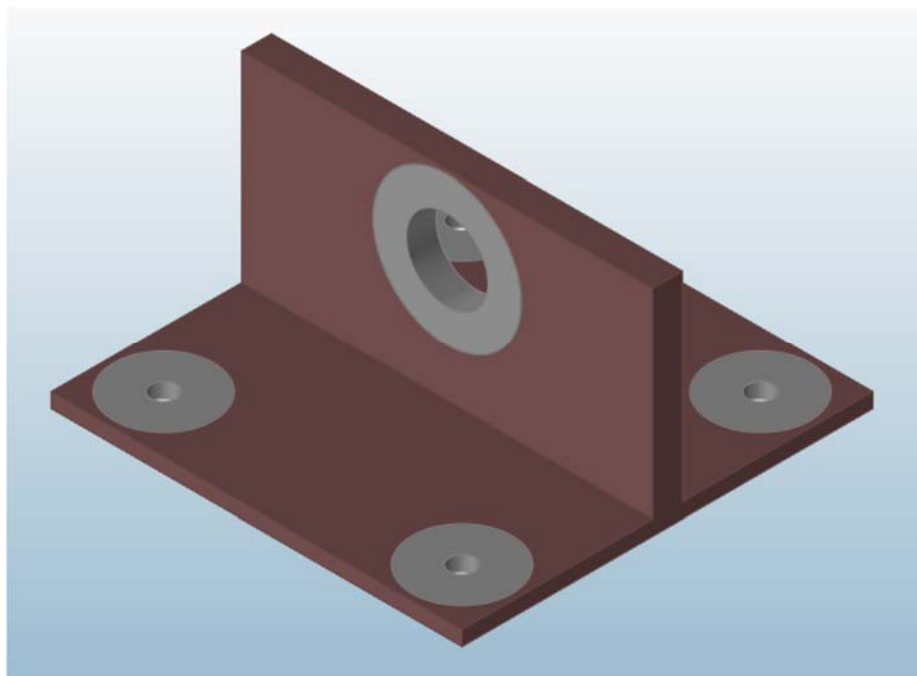
El primer paso a desarrollar en el procedimiento de optimización de la pieza es la creación de un modelo que reproduzca los fundamentos de forma de la pieza original y cumpla con las exigencias de rigidez y seguridad que se demanda. Este modelo será el objetivo de varias acciones de rediseño e iteraciones, con el fin de simular los resultados que se obtendrían en la pieza original.

Para generar modelos y su rediseño se ha utilizado la herramienta informática de diseño y optimización SolidThinking INSPIRE® versión 2014 (apartado 3.1). Con las facilidades que proporciona este programa y valorando la aplicación de distintos principios generales de modelado y optimización, se pueden obtener resultados muy positivos.

Como modelos previos a la optimización se han estudiado dos opciones posibles que cumplen con los márgenes de diseño impuestos por la funcionalidad de la pieza. Estas dos opciones son: Modelo 1: Perfil en T y Modelo 2: Perfil con base en bloque.

MODELO 1: Perfil en T

Este primer modelo a analizar consiste en un perfil en T, con las medidas generales del herraje original (ancho, altura, espesores...) pero simplificando su forma, eliminando redondeos. También se conservan los agujeros definidos, tanto de la unión móvil como de los remaches de sujeción de la base.



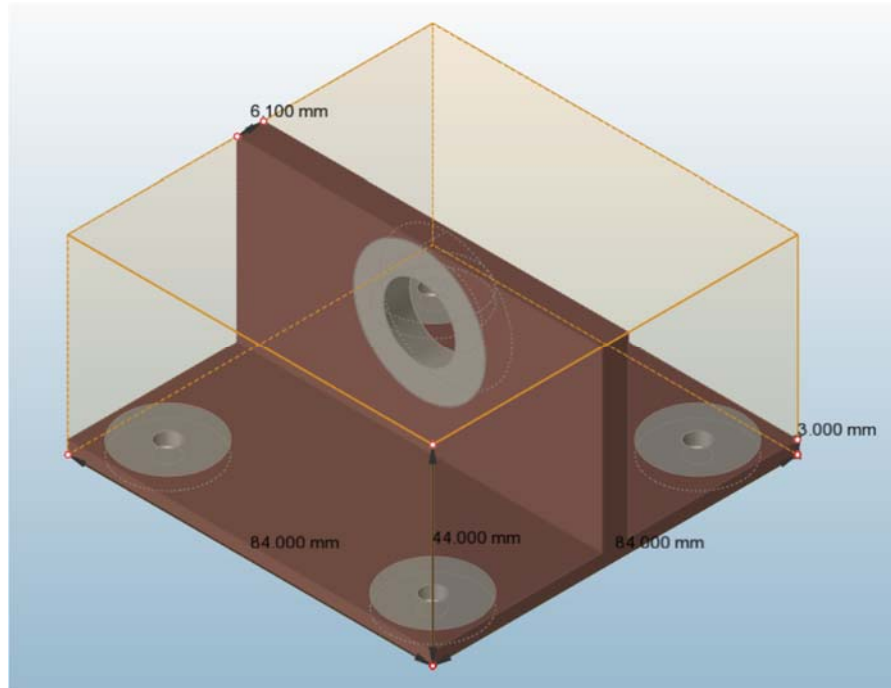


Figura 4.1. Modelo 1: Perfil en T. Pre-optimización.

Como condiciones de diseño se han creado unas regiones alrededor de las zonas implicadas en las uniones. Estas regiones no se han definido como área de diseño, y por lo tanto se mantendrán invariables durante el proceso de optimización (en gris en la Figura 4.1). Los criterios tomados para definirlos son los siguientes:

- Uniones en la base: se ha considerado la condición de distancia a borde típica en remaches, 2D ([7] Sección 8.1.1.3 Edge Distance Requirements). Por lo tanto, para mantener esta condición, se ha creado una región cilíndrica alrededor del agujero del remache con radio 2D ($R = 2 \cdot 5,1 = 10,2$ mm). Además tiene el mismo espesor de la pieza. Este área también asegura el apoyo mínimo necesario para la cabeza del remache y el resto de elementos de unión.
- Unión móvil: En esta zona va instalado el herraje hembra, la otra parte de la unión móvil, y el bulón que permite el movimiento. Se ha creado una región cilíndrica alrededor del agujero de unión para asegurar el posible apoyo de esta pieza, y cubre todo el perímetro para garantizar su posible rotación. El área de apoyo es de 15,16 mm de radio (14,16 mm + 1 mm de margen de seguridad, ver Anexo 3), y su espesor es el mismo que el de la pieza original (6,1 mm).
- Se ha impuesto una condición de simetría, tanto en plano Y como en plano Z, para conseguir una forma más homogénea.

Todas las partes creadas en el modelo se han definido en el material “Titanio Arcam”, generado en la herramienta INSPIRE® a partir de las propiedades especificadas por el fabricante ARCAM [14] y que se han presentado previamente en la Tabla 1 (apartado 2.1).

Partes y materiales				
Partes Biblioteca de materiales Mis materiales				
+ X				
Material ^	E	Nu	Densidad	Tensión de fluencia
Titanio Arcam	120.000E+03 MPa	0.295	4.425E-09 t/mm3	868.000E+00 MPa

Figura 4.2. Definición del material "Titanio Arcam" en INSPIRE®, y sus propiedades.

Las restricciones consideradas consisten en soportes situados en el centro de agujero, lugar de los remaches de sujeción en la base, simulando esta unión. Son empotramientos con libertad de giro.

En cuanto a las cargas aplicadas, se han tenido en consideración los fundamentos expuestos en el Anexo 1. Se han definido 4 casos de carga, que constan cada uno de los soportes antes mencionados, y dos cargas aplicadas en el centro del bulón, una axial y otra lateral. Estos casos de carga son:

- LC1: 2.750 N a tracción, con una carga lateral de 275 N.
- LC2: 2.750 N a tracción, con una carga lateral de 275 N (en sentido contrario del LC1).
- LC3: 2.750 N a compresión, con una carga lateral de 275 N.
- LC4: 2.750 N a compresión, con una carga lateral de 275 N (en sentido contrario del LC3).

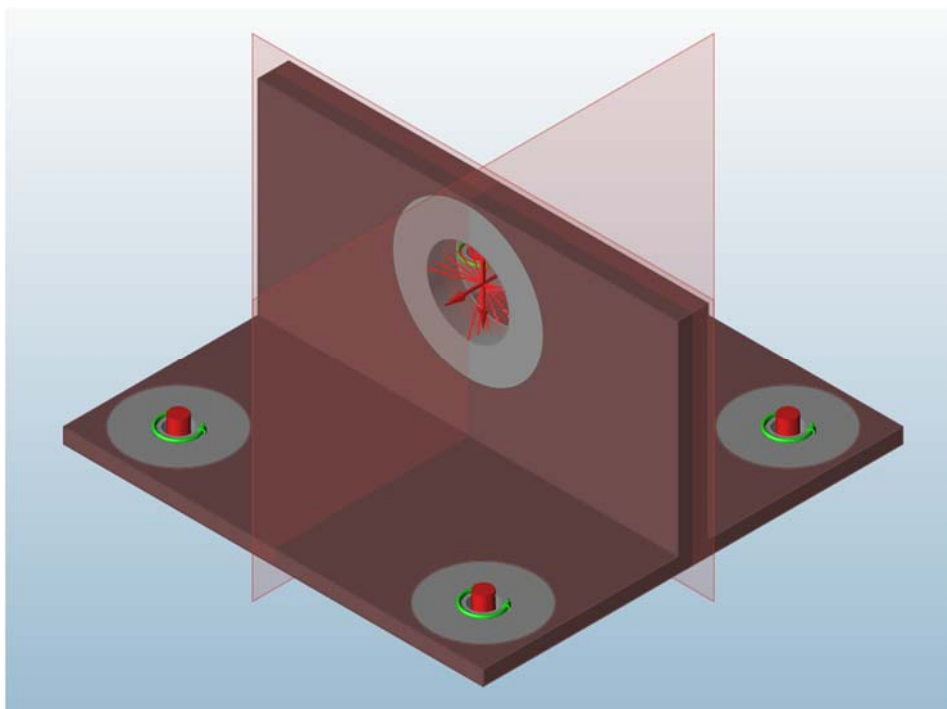


Figura 4.3. Modelo 1: Perfil en T. Pre-optimización. Cargas y restricciones aplicadas.

MODELO 2: Perfil con base bloque

El segundo modelo estudiado tiene algunas variaciones de forma respecto del primer modelo 1. También tiene un perfil en T, simplificando la configuración inicial, y las medidas globales se mantienen, pero en este caso la base tiene un espesor mayor (12,84 mm, hasta el borde de la zona de seguridad en la unión móvil). Se ha hecho este cambio para poder estudiar cómo varía la estructura con la nueva distribución de la masa en este “bloque” definido, la posibilidad de creación de nervios y huecos. Respecto al alma del herraje, se mantiene el espesor original, pero su altura se reduce (debido al aumento del espesor de la base).

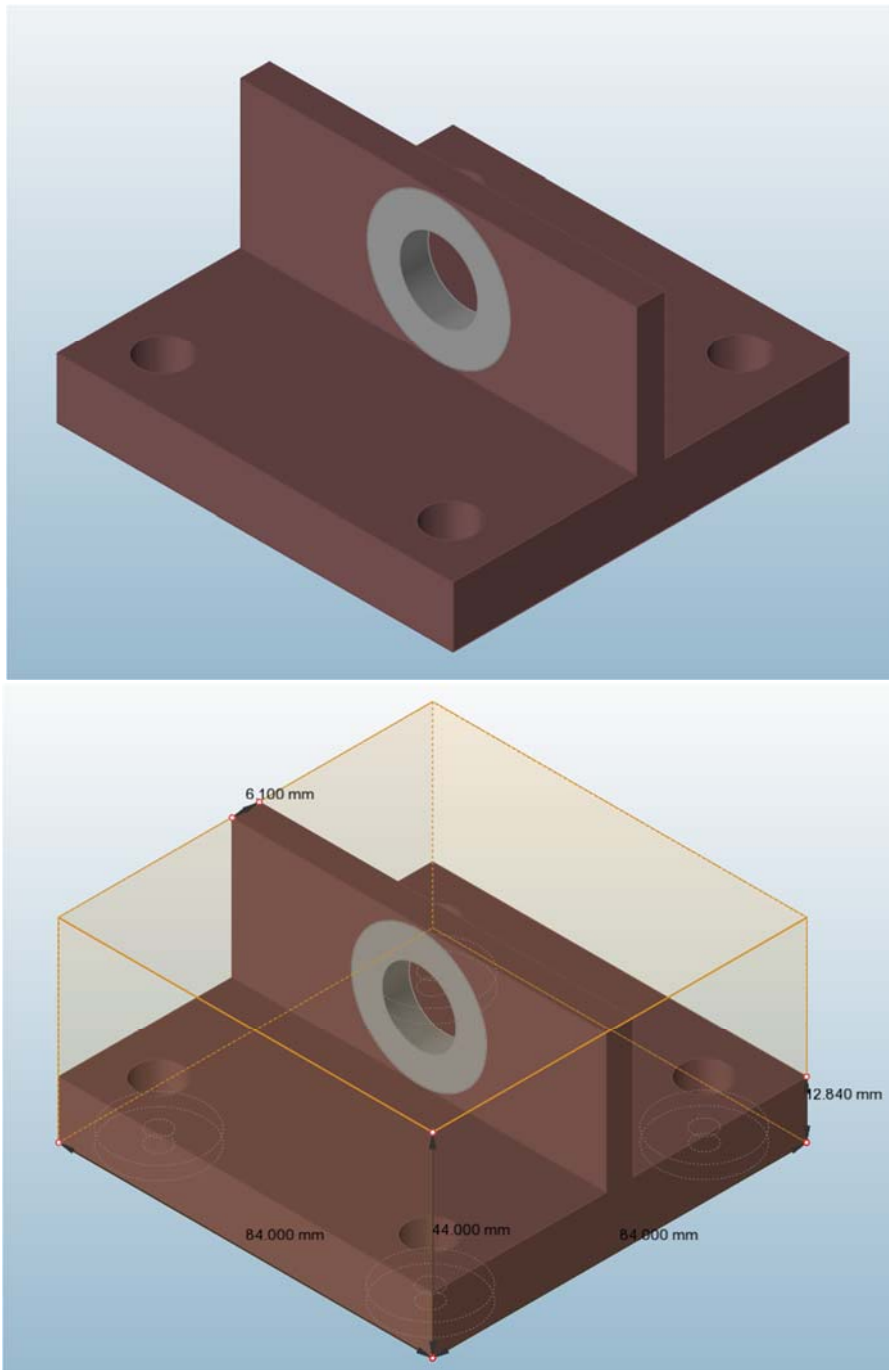


Figura 4.4. Modelo 2: Perfil con base bloque. Pre-optimización.

Las condiciones de diseño son las mismas que en el Modelo 1, con algunas diferencias:

- Uniones en la base: se mantiene la condición de distancia a borde típica en remaches de 2D creando una región cilíndrica alrededor del agujero del remache con dicho radio (10,2 mm). Su espesor es el mismo que el de la pieza original (3 mm). Como en este caso el espesor del modelo es mayor que el área de seguridad, se han dejado un hueco cilíndrico de diámetro 2D (10,2 mm) para poder introducir la cabeza de los remaches sin problemas y asegurar su correcta instalación.
- Unión móvil: Al igual que en el modelo 1, se crea un área alrededor del agujero para asegurar el acoplamiento adecuado del herraje hembra implicado en esta unión. Esta región de seguridad tiene 15,16 mm de radio y 6,1 mm de ancho.
- Se establece una condición de simetría en los planos Y y Z, para conseguir una estructura de la pieza más simple y homogénea.

Se aplican las mismas restricciones que en modelo 1, consistentes en soportes situados en el lugar de los remaches de sujeción en la base. Son empotramientos que permiten el giro.

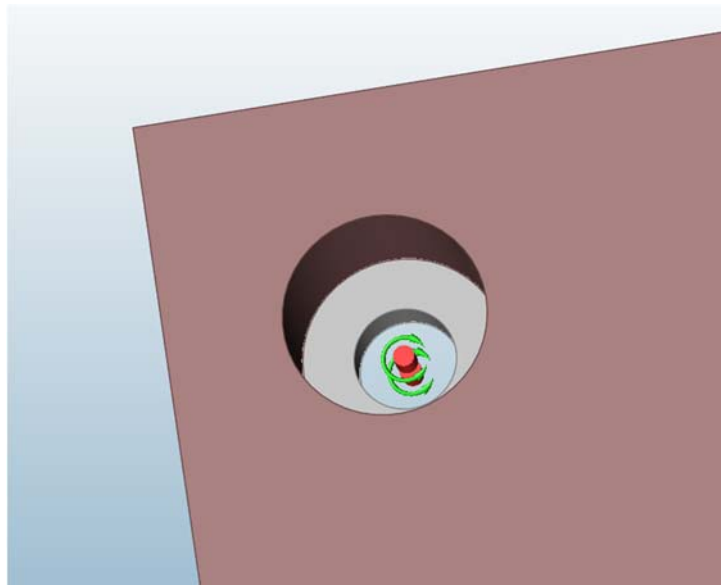


Figura 4.5. Modelo 2: Perfil con base bloque. Detalle de soportes aplicados.

Se han definido los mismos 4 casos de carga del modelo 1, con los respectivos soportes y aplicando las cargas en el centro del agujero de la unión móvil (según Anexo 1). Estos casos de carga son:

- LC1: 2.750 N a tracción, con una carga lateral de 2750 N.
- LC2: 2.750 N a tracción, con una carga lateral de 275 N (en sentido contrario del LC1).
- LC3: 2.750 N a compresión, con una carga lateral de 275 N.
- LC4: 2.750 N a compresión, con una carga lateral de 275 N (en sentido contrario del LC3).

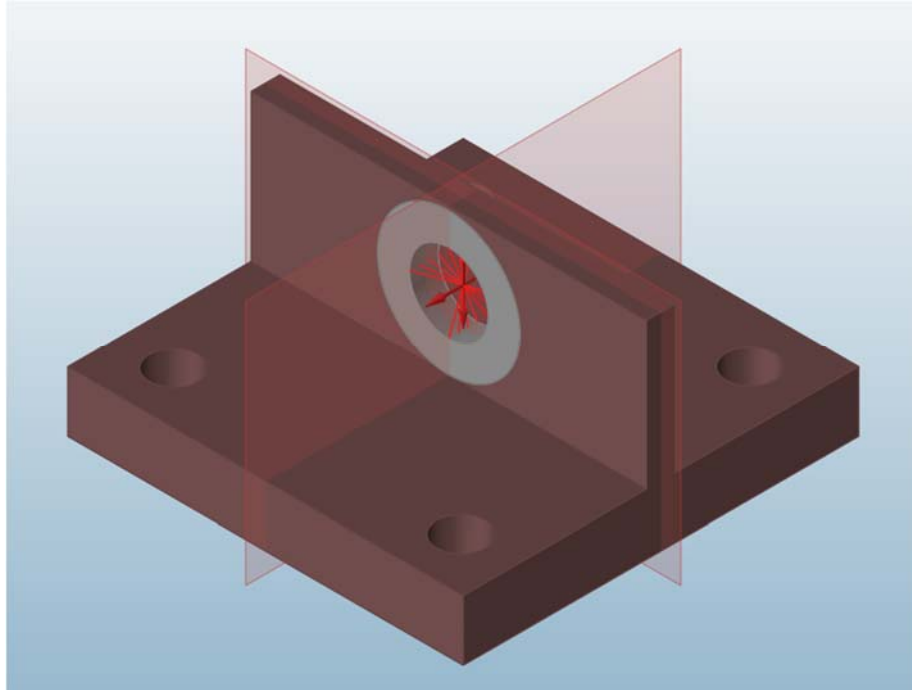
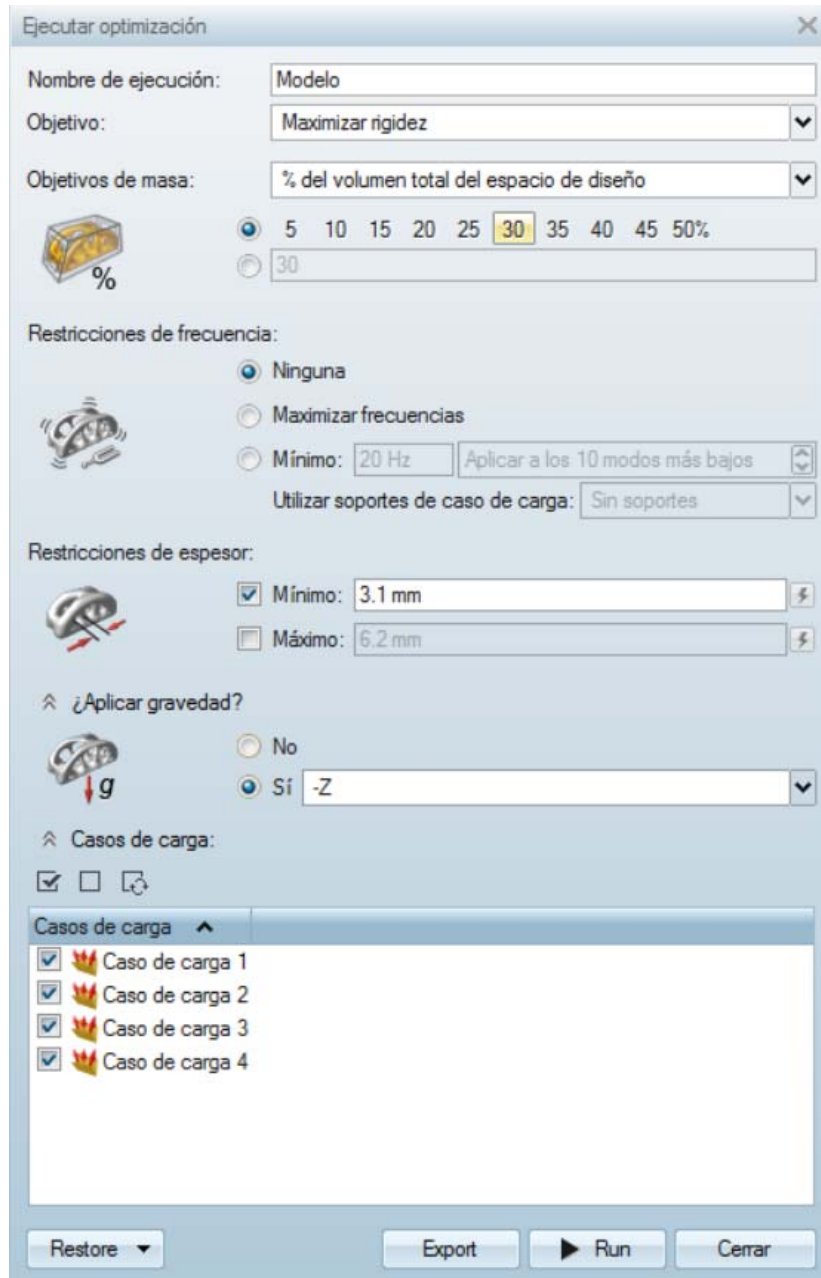


Figura 4.6. Modelo 2: Perfil con base bloque. Pre-optimización. Cargas y restricciones aplicadas.

5. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Es este apartado se detalla el proceso llevado a cabo para conseguir una optimización adecuada de los modelos creados para el estudio. En la herramienta INSPIRE® se pueden definir todos los parámetros a tener en cuenta en la operación. Para ejecutar la optimización se ha partido del principio de maximizar rigidez, buscando como objetivo reducir la masa hasta un 30% del total inicial. Este porcentaje, aunque es bastante reducido parece el adecuado, ya que los modelos previos a la optimización poseen más cantidad de materia que la pieza original, además de ser el estándar que propone la herramienta. Las restricciones mínimas de espesor son calculadas por el programa a partir de los espesores básicos que encuentra en el modelo. Aunque pueden ser modificadas, en este caso se utilizarán las que están por defecto. También se ha aplicado la acción de la gravedad terrestre (en eje Z). Se han seleccionado todos los casos de carga definidos para cada modelo. No se han considerado restricciones de frecuencia en este estudio. En la Figura 5.1 se puede observar la ventana de ejecución de optimización en el programa INSPIRE® y las opciones activadas para los Modelos 1 y 2 del presente estudio.



Ejecutar optimización

Nombre de ejecución: Modelo

Objetivo: Maximizar rigidez

Objetivos de masa: % del volumen total del espacio de diseño

5 10 15 20 25 30 35 40 45 50%

30

Restricciones de frecuencia:

Ninguna

Maximizar frecuencias

Mínimo: 20 Hz Aplicar a los 10 modos más bajos

Utilizar soportes de caso de carga: Sin soportes

Restricciones de espesor:

Mínimo: 3.1 mm

Máximo: 6.2 mm

¿Aplicar gravedad?

No

Sí -Z

Casos de carga:

Casos de carga

1 Caso de carga 1

2 Caso de carga 2

3 Caso de carga 3

4 Caso de carga 4

Restore Export Run Cerrar

Figura 5.1. Ventana de Optimización en la herramienta INSPIRE®

Una vez definidas todas las posibilidades de estudio, se ejecuta la optimización, y los resultados obtenidos para los dos modelos se describen a continuación.

MODELO 1: Perfil en T

El resultado de la optimización del Modelo 1 viene representado en la Figura 5.2.

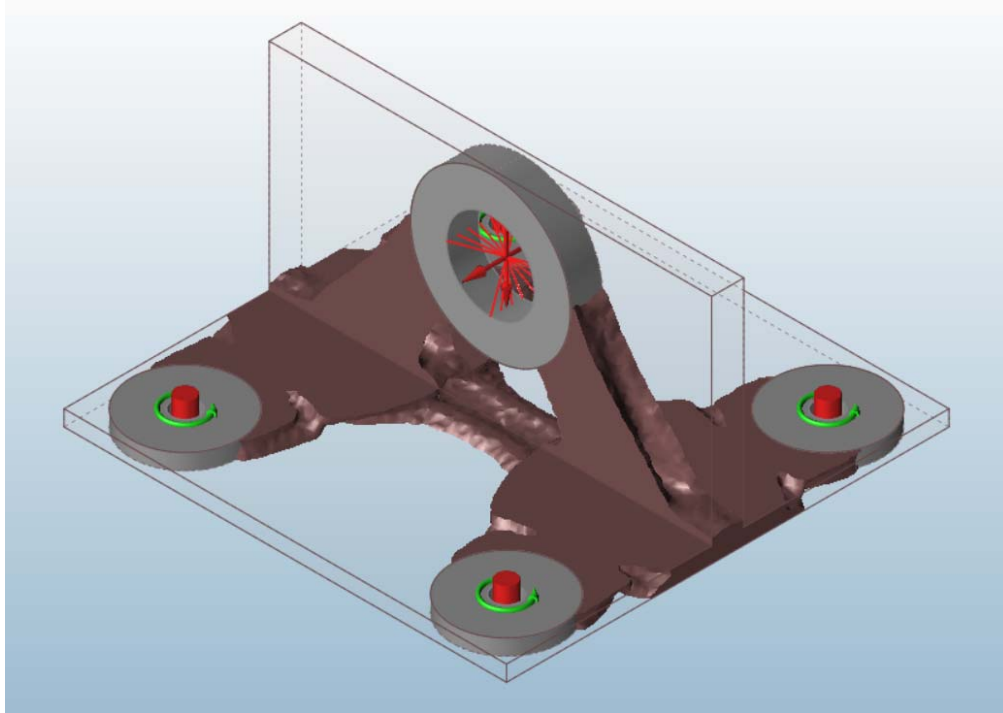


Figura 5.2. Modelo 1 optimizado en la herramienta INSPIRE®

Se observa que la reducción de material es considerable con respecto al modelo inicial. Se generan vacíos, ondulaciones y mellados ahí donde el material no es necesario. El alma del perfil queda en forma triangular acanalada, soportando la zona de unión móvil. En la base se genera una forma en H con redondeos hacia las uniones de los remaches, y el tramo central con un espesor menor. Es un modelo aceptable, ya que todas las partes no optimizables están unidas entre sí, y no se han creado perfiles imposibles de reproducir durante la fabricación. Las formas irregulares pueden ser suavizadas y ajustadas en un proceso posterior.

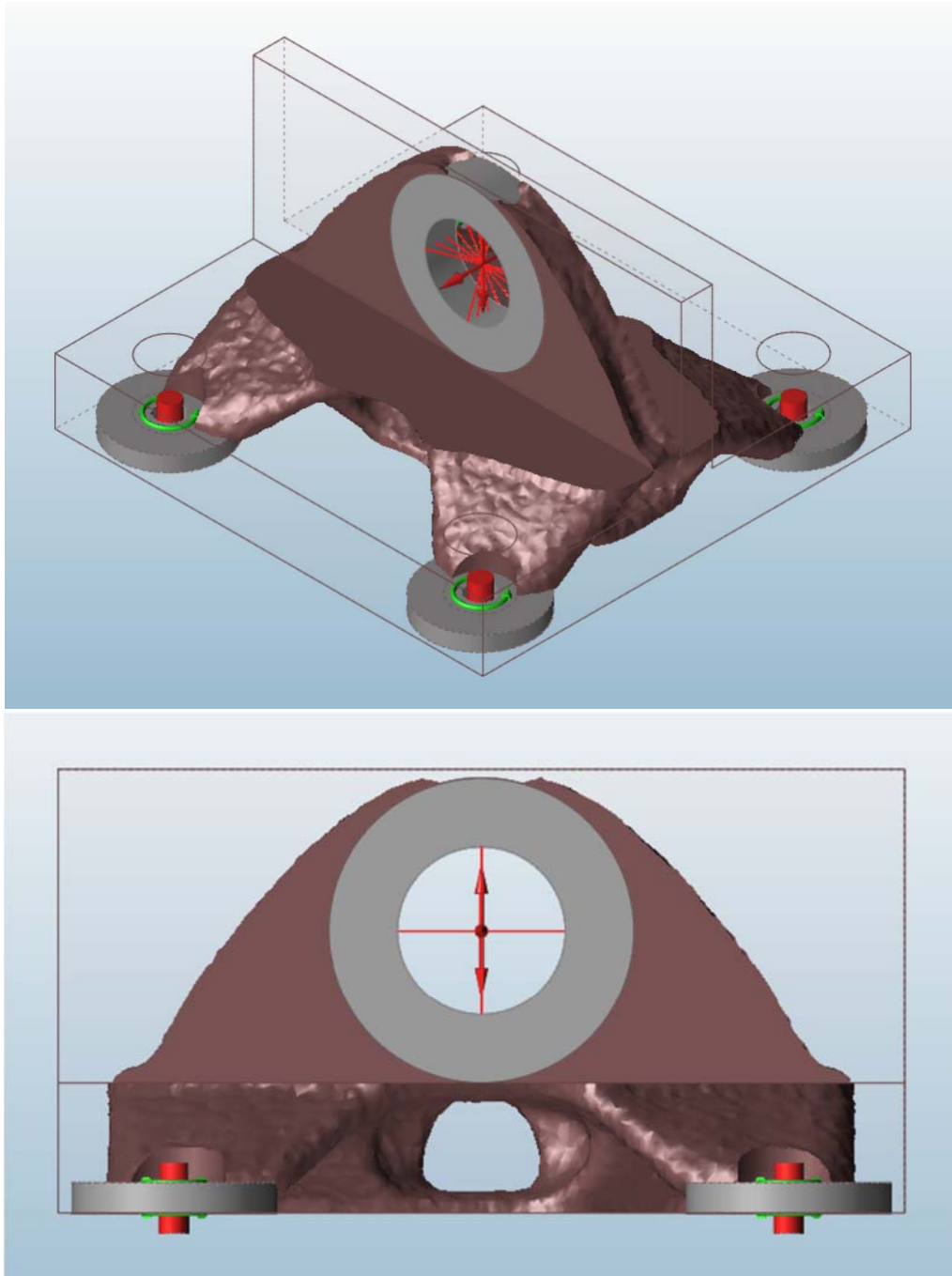
Los soportes que serían necesarios en este modelo constarían de un fino enrejado para sostener el vacío que queda en el alma y en el interior del hueco circular de la unión móvil. Estos huecos no son de grandes dimensiones por lo que la cantidad de material utilizado en los soportes será reducida.

El Modelo 1 optimizado alcanza una masa de 75,8 gr, aproximadamente un 60% de la masa de la pieza original, un buen resultado para una primera optimización.

Su análisis por elementos finitos proporciona resultados adecuados, teniendo máxima tensión de Von Mises de 379,1 MPa, lo que supone un factor de seguridad mayor de 2, y un desplazamiento máximo de $2,1 \times 10^{-2}$ mm. Los resultados completos de este análisis pueden comprobarse en el Anexo 4.

MODELO 2: Perfil con base bloque

La Figura 5.3 muestra tres vistas distintas de la pieza obtenida tras la operación de optimizado del Modelo 2:



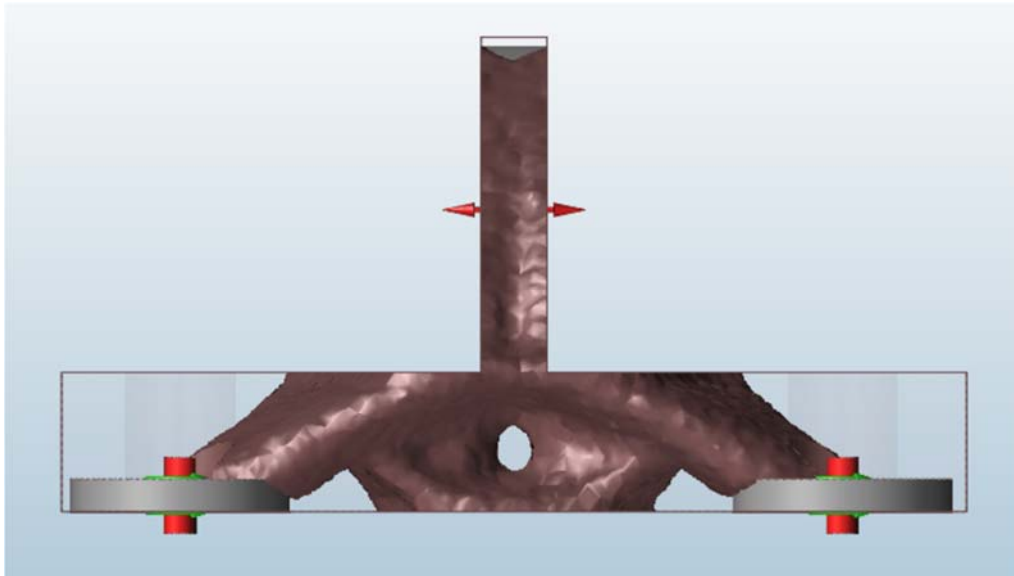


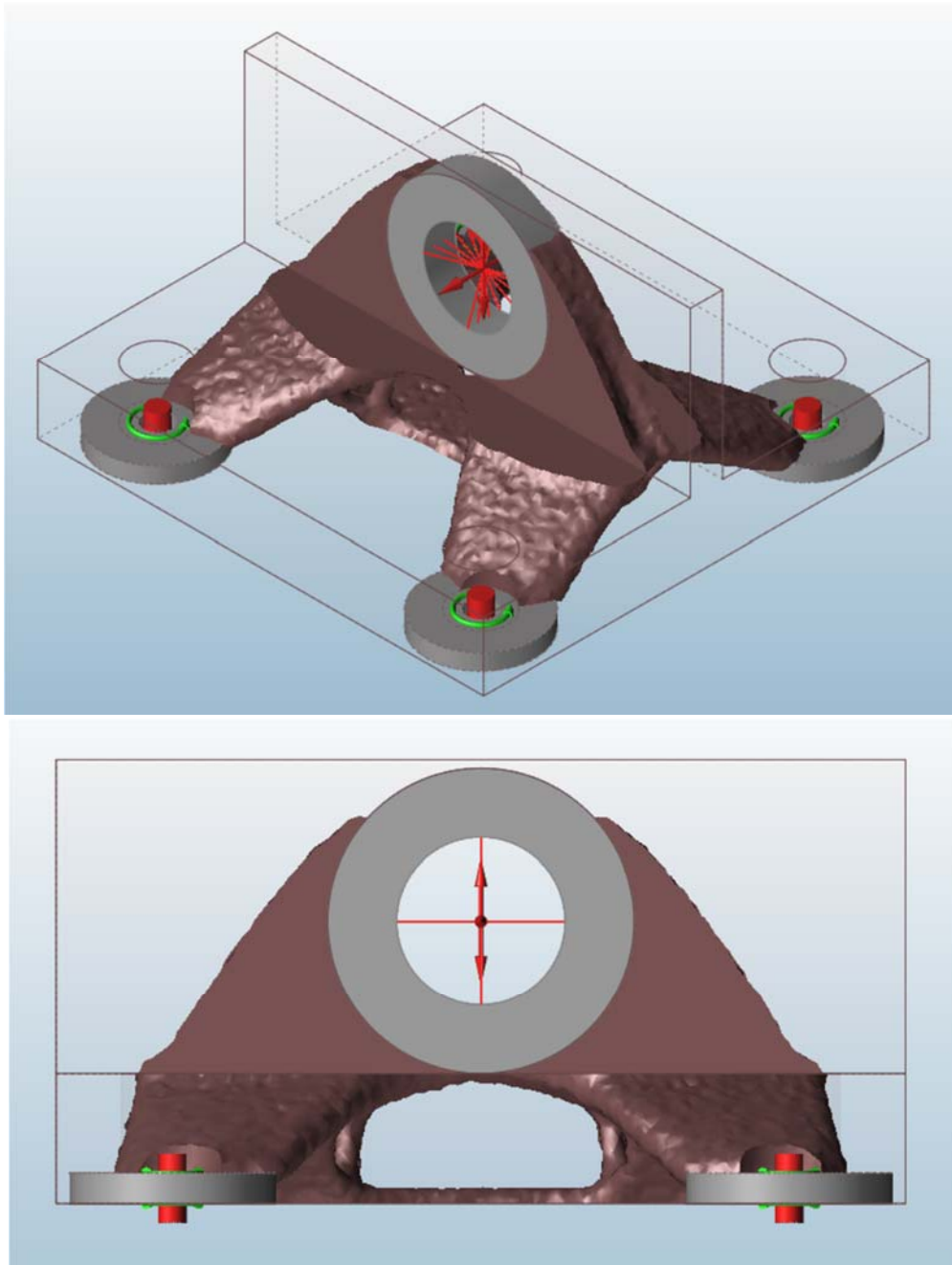
Figura 5.3. Modelo 2 optimizado en la herramienta INSPIRE®

Se aprecia que el bloque de materia que conformaba la base se ha transformado en varios nervios, canales y zonas huecas, quedando el alma soportada por unas extremidades que la conectan con las zonas no optimizables de las uniones de la base, y una base hueca bajo el alma. En este caso, el alma tiene una forma más redondeada en comparación al Modelo 1 optimizado. Este modelo concluye en una forma compleja pero estructuralmente resistente, a pesar del poco material utilizado. Al igual que en el Modelo 1, las superficies pueden ser suavizadas y mejoradas de manera que la pieza tenga mejor aspecto final.

Esta optimización del Modelo 2 alcanza una masa de 155,1 gr, sobrepasando al modelo original en más del 20%, lo que indica que no cumple con el objetivo de optimización. Todas las conclusiones de este análisis vienen reflejadas en el Anexo 5.

Como el resultado no es válido se ha realizado un segundo estudio de optimización, reduciendo el volumen total de espacio de diseño al 20%, en vez de al 30% como en un principio, y manteniendo el resto de parámetros sin variar.

La Figura 5.4 muestra tres vistas distintas de la pieza obtenida tras la operación de optimizado del Modelo 2 al 20% de masa:



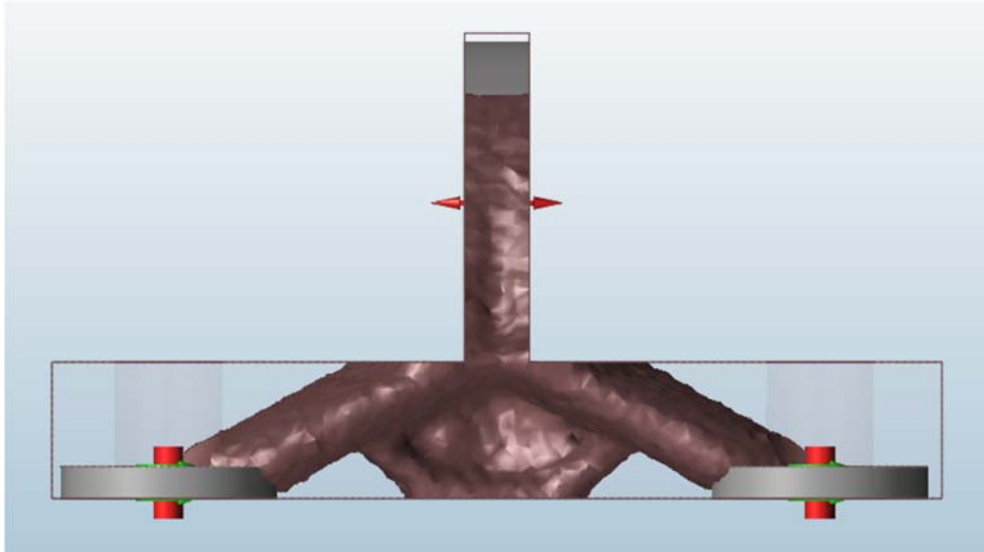


Figura 5.4. Modelo 2 optimizado en la herramienta INSPIRE® al 20% de masa

Se advierte la disminución de materia respecto de la optimización al 30% de masa, distinguiéndose unas formas más definidas y una base menos saturada.

Con esta segunda optimización, la masa del modelo se aproxima a los 110,2 gr, el 86% de la masa de la pieza original. La tensión máxima soportada es de 136,9 MPa (con un factor de seguridad de 6) y el desplazamiento máximo alcanza $2,8 \times 10^{-2}$ mm. Ver Anexo 6 para consultar todos los resultados de este estudio.

Analizando este modelo se comprueba que serían necesarios una gran cantidad de elementos de soporte. Habría que sostener las extremidades y todo el interior hueco de la base, además del orificio de la unión móvil.

Aunque el porcentaje de reducción de masa no es significativo, los resultados estructurales son bastante notables como para tener en cuenta este modelo.

Para intentar lograr un mejor resultado en términos de masa, se ha generado una nueva optimización, al 15% del volumen total, pero el modelo conseguido no es viable estructuralmente, ya que se producen vacíos en zonas imprescindibles, por lo que es desechado.

5.1. ELECCIÓN DEL MODELO ADECUADO

Contrastando los resultados obtenidos en la optimización y análisis de los dos modelos, se ha elegido como opción más conveniente la del Modelo 1. Los motivos se basan principalmente en el peso de la pieza, objetivo fundamental de la optimización para componentes aeronáuticos. La optimización del Modelo 1 tiene un porcentaje de reducción de masa respecto de la pieza original considerablemente menor que el del Modelo 2. Este aspecto también será favorable respecto a la velocidad de fabricación, a menos masa más rapidez de fabricado. Además el material utilizado para generar soportes también es bastante menor, lo que afectaría al ratio buy-to-fly. En cuestión de resistencia, el

Modelo 1 tiene un factor de seguridad de 2,2, menor que el del Modelo 2 (mayor de 6) pero completamente aceptable en una estructura aeronáutica.

Por tanto, con esta elección se determina que la optimización del Modelo 1 cumple con los fines buscados. En apartados posteriores se realizará un proceso de suavizado de formas y su análisis en términos de fabricación.

6. SUAVIZADO DE FORMA

El modelo obtenido en el proceso de optimización con INSPIRE® reduce considerablemente la masa del modelo inicial y cumple con las restricciones impuestas. Este modelo podría ser fabricado por EBM directamente a pesar de sus superficies ligeramente irregulares. Aun así, se ha optado por suavizar sus formas para obtener un modelo más idóneo visualmente.

Para conseguir el afinado propuesto, se ha seguido el siguiente procedimiento.

Con el programa informático de diseño CATIA (apartado 3.2), en su versión V5 21, se ha cargado el archivo .igs creado en la herramienta INSPIRE® del Modelo 1 optimizado y se ha superpuesto al Modelo 1 inicial sin optimizar. Con ello se han comparado los dos y se ha localizado el material eliminado por el programa. Sobre el Modelo 1 inicial, se han realizado una serie de vaciados con formas regulares en las mismas zonas optimizadas, emulando al modelo optimizado e intentando aproximarse a su forma.

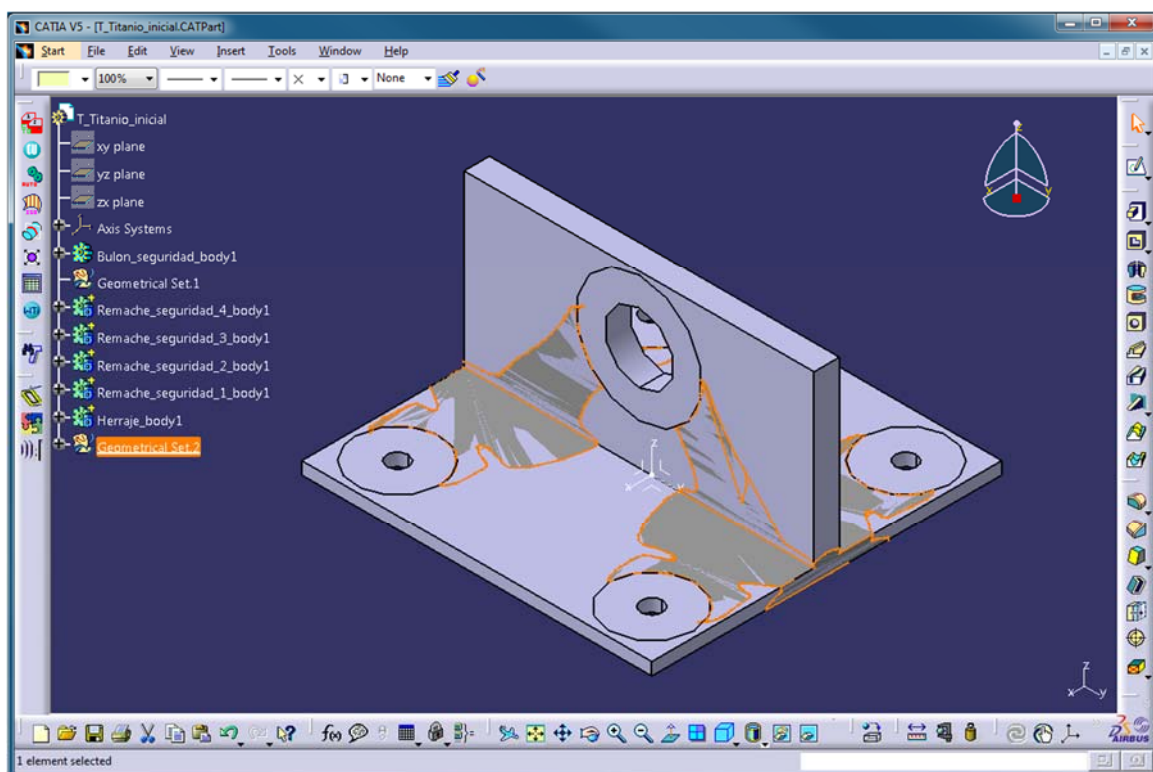


Figura 6.1. Suavizado de formas en el programa CATIA

Se han mantenido ciertas reglas de simetría para que el conjunto completo final quede simétrico. Algunas formas se han ignorado, como los vaciados en el alma o los mellados cerca de las uniones de la base. Esto es debido a que posteriormente se va a llevar a cabo una segunda optimización para acercarse más a un resultado idóneo. El Modelo 1 conseguido tras el suavizado de formas se puede observar en la Figura 6.2:

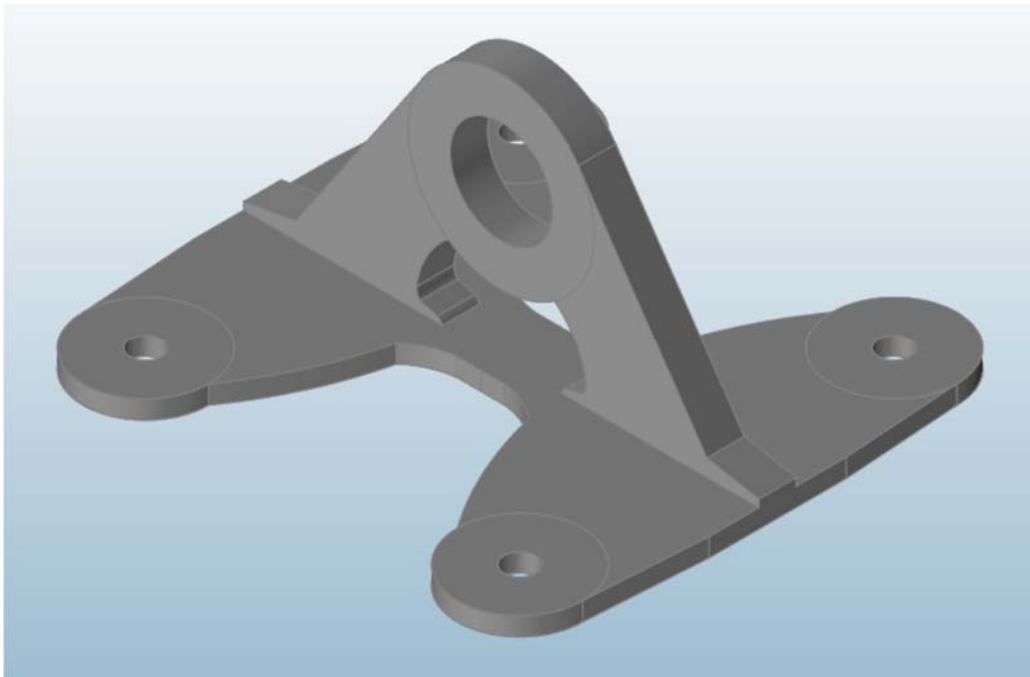


Figura 6.2. Modelo 1 optimizado. Suavizado de formas

Tras el ajustado de las superficies en la herramienta Catia, se ha transferido el archivo de nuevo a INSPIRE® para analizar por elementos finitos el modelo obtenido y comprobar su efectividad. Con este recorte de materia se obtiene un factor de reserva de 1,31, y las máximas tensiones, de 660,7 MPa, se siguen concentrando en los agujeros de los remaches de la base (ver resultados completos del análisis en el Anexo 7).

MODELO OPTIMIZADO: SEGUNDA OPTIMIZACIÓN

Para mejorar este modelo se realiza una segunda optimización, con parámetros más restrictivos para conseguir resultados más ajustados. Se ha reducido el tamaño de elemento de espesor mínimo y máximo, a 1 y 2 mm respectivamente, cuando en un principio eran 3,1 y 6,2 mm. Con este nuevo cambio se adquieren superficies más precisas y con rugosidades menos acentuadas. También se ha aumentado el porcentaje de volumen de diseño a alcanzar, siendo ahora del 70%, ya que en la primera optimización ya se quitó una cantidad de masa considerable y no se desea reducir los factores de reserva conseguidos. El resto de parámetros y casos de carga se mantienen igual. Con estos factores se ejecuta la segunda optimización, obteniéndose el modelo de la Figura 6.3:

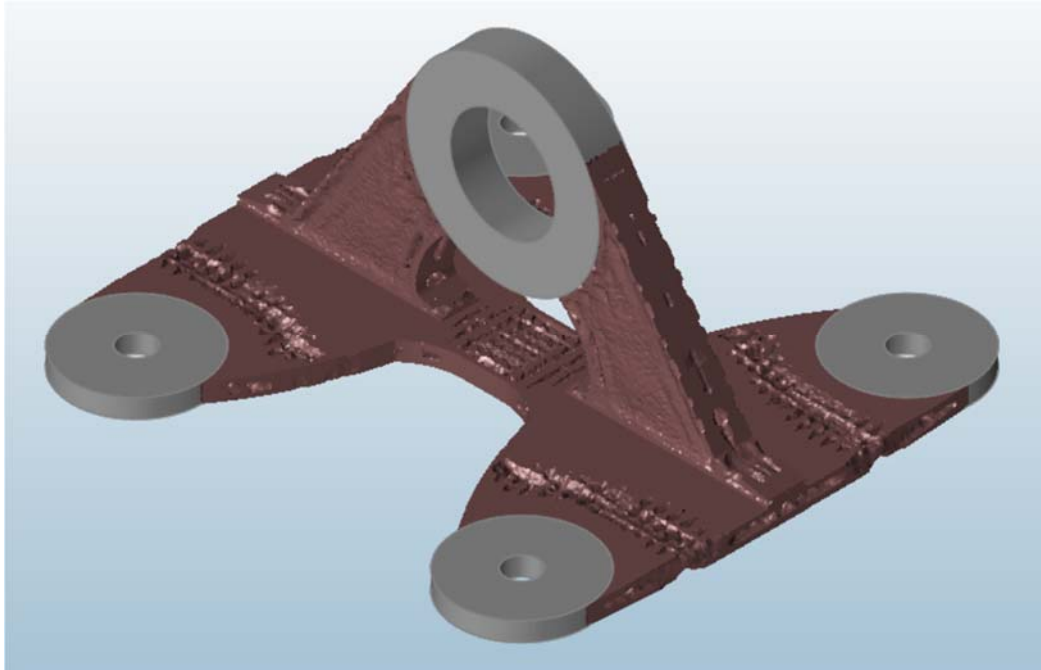


Figura 6.3. Modelo ajustado. Segunda optimización.

Se puede observar como hay una reducción de materia en la base, en forma de canales bordeando las zonas de seguridad de los remaches de unión, tanto por la parte superior como la inferior. También destaca la disminución de materia en la zona central de la base, quedando hueca con una rejilla en la zona superior. En el alma aparecen zonas huecas, y en las superficies laterales se crean vaciados de pequeño espesor.

Con este modelo se efectúa el mismo procedimiento llevado a cabo para la primera optimización. Se cambia el formato del modelo y se introduce en el programa CATIA, para adaptar el resultado obtenido a formas más ajustadas.

Los nervios creados en la base se han interpretado como canales curvos, bordeando las zonas de unión de los remaches, y de espesor de 1 mm. En la zona central de la base se ha reducido el espesor a la mitad, prescindiendo del enrejado superior. Además se han creado los vaciados en los laterales del alma, y se ha reducido el material de los extremos cercanos a la base. El modelo logrado tras las modificaciones se puede observar en la Figura 6.4:

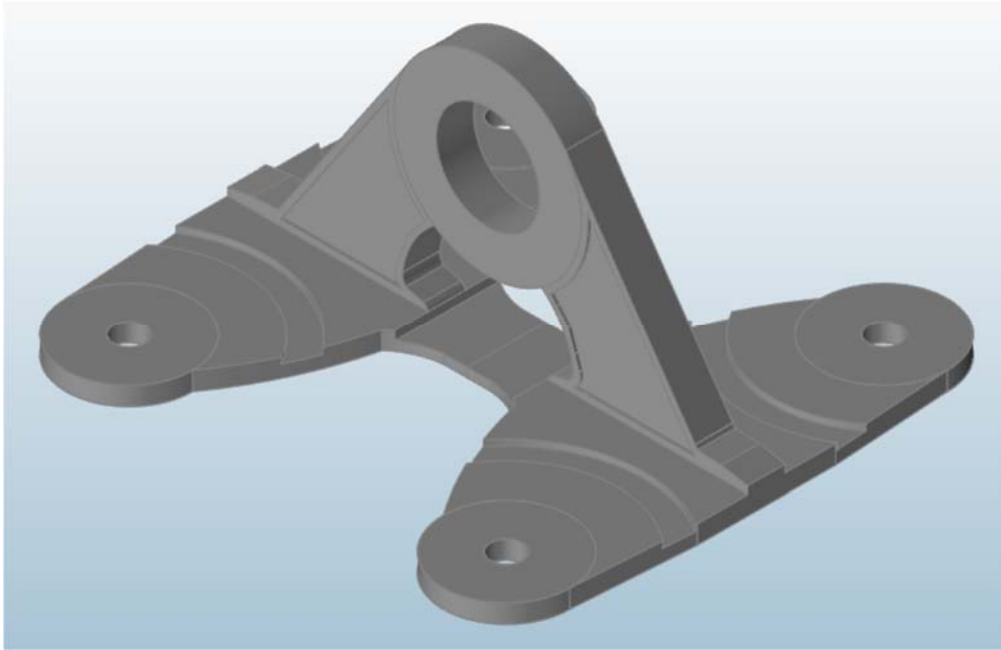


Figura 6.4. Modelo 1 optimizado. Segunda optimización. Suavizado de formas

El análisis por elementos finitos de este modelo en INSPIRE® proporciona resultados convenientes: La tensión máxima de Von Mises alcanza los 713,2 MPa, y por tanto el factor de seguridad es de 1,22, suficiente para la función estructural del herraje. El desplazamiento máximo es de 0,27 mm y el peso total de 84,5 gr, un 66% de la masa del herraje original, notándose una reducción importante. Estos valores convierten a este modelo final en adecuado y queda como solución concluyente para considerar su fabricación mediante impresión 3D.

7. FABRICACIÓN

Tras el rediseño optimizado de la pieza se pretende desarrollar un estudio de fabricación, tanto para el herraje original como para el optimizado, realizando una comparación de los factores implicados en este proceso: tiempos, costes, maquinaria, etc. El objetivo es cotejar ambos métodos y distinguir las diferencias y las ventajas obtenidas.

7.1. PIEZA ORIGINAL: FABRICACIÓN POR MECANIZADO

PROCESO DE FABRICACIÓN:

La pieza original se fabrica mediante una serie de diferentes procedimientos. Se parte del material en bloques no tratados. Para comenzar se generan perfiles macizos de la aleación de titanio con una forma básica (cuadrado o en T, dependiendo de la inversión que se quiere realizar), durante un proceso de extrusión. Tras un apropiado enfriamiento del material, se cortan los perfiles en pequeños bloques del tamaño de la pieza. Posteriormente los bloques son mecanizados, retirando material y realizando los agujeros de las uniones, hasta obtener su forma final. Después se somete la pieza a un tratamiento térmico, que le proporciona las propiedades adecuadas, y un posterior enfriamiento. Para finalizar se realiza un acabado superficial en las zonas que necesitan tolerancias más reducidas de rugosidad.

HERRAMIENTA:

Los procesos de extrusión y los tratamientos térmicos es necesario realizarlos en centros metalúrgicos especializados. En cuanto al mecanizado puede llevarse a cabo en cualquier centro de mecanizado o fresadora de 3 ejes de control numérico, ya que no son operaciones muy complejas.

TIEMPO DE FABRICACIÓN:

En este caso el tiempo de fabricación es difícil de calcular, debido a que cada proceso depende de muchos factores y debe ejecutarse en distinta máquina y lugar. Por tanto, para hacer una estimación de tiempos de maniobra, se ha considerado que todas las fases se realizan en el mismo edificio. A continuación se exponen los tiempos aproximados de cada etapa de fabricación, incluyendo tiempos de manipulación:

- Extrusión de perfiles: 4 h (incluyendo enfriamiento)
- Corte de bloques: 20 min
- Mecanizado (torneado y taladrado, incluyendo cambios de herramienta): 1 h y 15 min
- Tratamiento térmico: 2 h (incluyendo enfriamiento)
- Acabado superficial: 25 min

Englobando todos estos periodos, el tiempo final de fabricación estimado para la pieza original es de 8 horas.

Todos los tiempos son unitarios. Para el cálculo se ha supuesto la fabricación de perfiles en T, por lo que los tiempos de mecanizado son más reducidos. No se han considerado los tiempos de recambio de herramienta (una vez ya están desgastadas las plaquitas) por suponerse despreciables en la fabricación de una sola pieza.

RATIO BUY-TO-FLY

El ratio buy-to-fly es un concepto muy utilizado en el sector aeronáutico, y consiste en la relación entre el peso de la pieza final y la cantidad de material necesaria para su fabricación. En este caso la pieza se fabrica a partir del perfil en T macizo de Ti-6Al-4V (propiedades en Tabla 1) de dimensiones las máximas de la pieza (84x84x44 mm). El cálculo de la relación buy-to-fly es el siguiente:

$$\text{BTF} = P_f / P_t = 0,71$$

Donde:

P_f es el peso final de la pieza: 127,3 gr = 0,1273 Kg

P_t es el peso total de material del bloque inicial: 179,8 gr = 0,1798 Kg (calculado con la herramienta INSPIRE)

El caso ideal sería que el BTF fuera lo más próximo a 1, indicando que se desperdicia poca cantidad de material, pero en este estudio se comprueba que no es todo lo ajustado que sería deseable. En el caso de que la pieza se mecanizase a partir de bloques macizos, este ratio sería mucho más reducido y menos adecuado.

7.2. PIEZA OPTIMIZADA: FABRICACIÓN ADITIVA**PROCESO DE FABRICACIÓN:**

Como se ha descrito en apartados anteriores, el herraje optimizado se considera fabricado mediante fusión por haz de electrones (Electron Beam Melting). El desarrollo de la fabricación sigue diferentes fases: primero la fabricación propiamente dicha, a partir del material en polvo se genera la pieza en la máquina de EBM. A continuación se deja enfriar antes de manipularla, ya que el proceso sucede a altas temperaturas. Tras el tiempo de reposo, la pieza se traslada a una cámara para retirar el polvo sobrante adherido a la pieza. El pre-calentamiento producido durante la fabricación hace que el polvo se compacte alrededor de la pieza pero sin llegar a fundirse, y suele ser retirado con aire comprimido. Para geometrías complicadas se debe prestar gran atención durante esta fase, para evitar que quede polvo encerrado. La siguiente fase consiste en un tratamiento térmico, en este caso un HIP, conveniente para liberar tensiones residuales y mejorar las características metalúrgicas y superficiales de la pieza. Por último se realiza la retirada de las estructuras de soporte de forma mecánica, y se tratan las zonas que necesiten un acabado superficial especial, en este caso la parte de la unión móvil (mediante pulido, rectificado o granallado) con el fin de cumplir con tolerancias críticas y que las piezas no friccionen.

HERRAMIENTA:

Para la fabricación de la pieza se ha considerado la utilización de una máquina de la empresa ARCAM, precursora del EBM, especializada en fabricación de piezas en aleaciones de Titanio. En este caso es el modelo ARCAM A2X, y sus especificaciones técnicas, proporcionadas por ARCAM [14] se pueden observar en la Tabla 2:

Potencia del haz de electrones	50-3000 W (variable)
Tamaño del punto de haz	0,2 - 1,0 mm (variable)
velocidad de escáner del haz de electrones	~ 8000 m/s
Ratio de fabricación (para Ti6Al4V)	55/80 cm ³ / h
Acabado superficial (horizontal y vertical)	Ra25/Ra35
Presión de vacío base	< 1x10 ⁻⁴ mbar
Fuente de alimentación	3 x 400 V, 32 A, 7 kW
Tamaño y peso	1850 x 900 x 2200 mm (W x D x H), 1420 kg
Interfaz de proceso CAD	PC
Interfaz CAD	Standard: STL

Tabla 2. Máquina ARCAM A2X de fabricación aditiva por EBM. Especificaciones



Figura 7.1. Máquina ARCAM A2X de fabricación aditiva por EBM.

En cuanto a los otros procesos involucrados en la fabricación, el tratamiento de HIP se realiza en un recipiente contenedor de alta presión o en hornos especializados, mientras que el acabado superficial puede llevarse a cabo en una fresadora o centro de mecanizado común con herramientas de acabado.

TIEMPO DE FABRICACIÓN:

Al igual que para la pieza original, se ha supuesto que todos los procesos se realizan en el mismo edificio. El tiempo estimado de fabricación se calcula a partir de las especificaciones de máquina proporcionadas por el fabricante (ver Tabla 2). Multiplicando el volumen de la pieza por la velocidad de fabricación se obtendrá el tiempo final. El volumen total de la pieza se ha calculado a partir de la masa proporcionada por el programa INSPIRE, y se ha añadido el 40% del volumen de las zonas donde deben fabricarse soportes. Este cálculo da el siguiente resultado:

$$V_t = V_p + V_s = 22,42 \text{ cm}^3$$

Donde:

V_t es el volumen total = 22,42 cm³

V_p es el volumen de la pieza = 19,1 cm³

V_s es el volumen de los soportes = 3,324 cm³

El tiempo de fabricación aproximado sería:

$$T_f = V_t / v_f = 0,345 \text{ h} = 20,7 \text{ min} \simeq 21 \text{ min}$$

Donde:

T_f es el tiempo de fabricación de la pieza.

v_f es la velocidad de fabricación de la máquina. Se ha elegido una velocidad media del ratio proporcionado por el fabricante, 65 cm³/h

A este tiempo se le deben sumar la duración de las otras fases que completan el proceso de fabricación, anteriormente descritas. A continuación se muestran los tiempos aproximados de dichos períodos, incluyendo sus tiempos de manipulación:

- Enfriamiento: 20 min
- Limpieza del polvo sobrante: 20 min
- Retirada de soportes: 20 min
- HIP: 2 h y 30 min (incluyendo enfriamiento posterior)
- Tratamiento superficial: 25 min

Por tanto el tiempo total de fabricación es aproximadamente de 4 horas y 16 minutos. Los filamentos del láser de la máquina de EBM se cambian cada 50 horas de trabajo, por lo que no se ha considerado el tiempo de recambio en el cálculo.

RATIO BUY-TO-FLY

Para este procedimiento de fabricación, la relación buy-to-fly consta únicamente en la cantidad de materia utilizada para la fabricación, ya que en la impresión 3D no hay sobrantes de material y el polvo metálico se puede reutilizar. Este ratio quedaría:

$$BTF = P_f/P_t = 0,93$$

Donde:

P_f es el peso final de la pieza: 84,51 gr = 0,08451 Kg

P_t es el peso total de material utilizado, añadiendo el material de los soportes, que es sobrante:
 $0,08451 + (0,0147 \times 0,4) = 0,09039$ Kg

Aquí el ratio es muy cercano a 1, lo que demuestra que la pieza diseñada es eficiente en términos de material.

7.3. COMPARATIVA ENTRE FABRICACIÓN CONVENCIONAL Y FABRICACIÓN ADITIVA

- Material sobrante: La gestión del material sobrante en el proceso de fabricación es más cómodo y sencillo en la fabricación aditiva, ya que es fácil de retirar mediante aire comprimido en cámaras cerradas, e incluso se puede reutilizar. Sin embargo el tratamiento de las virutas sobrantes en el mecanizado convencional requiere de su separación del fluido de corte y una posterior gestión adecuada, además pueden producir problemas medioambientales y costes excesivos por su almacenamiento.
- Tiempos de fabricación: Destaca que el tiempo de fabricación de la pieza original supera con creces al de la pieza optimizada. Lo que supone la diferencia es la fase de extrusión metalúrgica, ya que la manipulación de metales a grandes temperaturas necesita largos periodos de calentamiento y enfriamiento, lo que también implica un aumento de los costes.
- Ratio buy-to-fly: El ratio de la pieza optimizada es bastante más cercano a 1 que el de la pieza original, y con ello más adecuado para cumplir los objetivos de ahorro de material que se propone alcanzar.
- Maquinaria: El proceso de fabricación de la pieza original conlleva un mayor número de fases, a su vez más complejas, y la utilización de máquinas que en la pieza optimizada, lo que supone también costes más elevados.
- Extrusión: La fase de extrusión en la fabricación de la pieza original es relevante en el proceso total. Dependiendo de la forma del perfil extruido, se requieren controles más estrictos en la fabricación, además se debe mecanizar la pieza en mayor o menor medida, afectando al ratio buy-to-fly. Esto supone una variación en los tiempos y el gasto total, con lo que sería necesario una evaluación de todos estos cambios para optar por la más rentable en todos los aspectos.

8. PRESUPUESTO

En este apartado se refleja el coste económico del total de la actividad realizada. El presente proyecto incluye un compendio de información referente a la fabricación aditiva, métodos y propiedades, el análisis y diseño del herraje para adaptar su fabricación a la EBM, y el cálculo y comparación de parámetros relacionados con la fabricación (costes, material, herramienta), tanto para el método convencional (mecanizado) como para la fabricación aditiva. Para calcular el coste económico del estudio de ingeniería se establece una remuneración de 20€/hora de trabajo. El presupuesto detallado referente a las tareas mencionadas, incluyendo recursos informáticos, es el siguiente:

CONCEPTO	HORAS	IMPORTE
Equipo informático		1200 €
Licencia Programa INSPIRE (licencia de estudiante)		0 €
Licencia Programa CATIA (licencia de prueba)		0 €
Trabajo de ingeniería	256	5120 €
TOTAL		6320 €

Tabla 3. Resumen de presupuesto.

9. CONCLUSIONES

El objetivo del presente estudio era evaluar las mejoras que supone la fabricación de una determinada pieza mediante la impresión 3D, con su previa optimización topológica

- El actual desarrollo de la fabricación aditiva, y sus diferentes métodos, puede proporcionar numerosos beneficios a la gran mayoría de sectores de ingeniería y fabricación, y revolucionar el mercado en muchos aspectos. Las ventajas más destacables que puede aportar son: la capacidad de generar piezas con superficies complejas y de distintos materiales, el ahorro de material sobrante, no existe la necesidad de utillajes, y ofrece una considerable reducción en los tiempos de fabricación.
- Todas estas ventajas han promovido la intención de realizar el presente estudio, para dejar constancia de que las mejoras en la fabricación son factibles. El estudio se ha aplicado a una pieza de unión del fuselaje de una aeronave, ya que el sector aeronáutico es uno de los más involucrados en aplicar las ventajas de la FA.
- Una fase de optimización topológica es indispensable para conseguir los mejores resultados posibles dentro del proceso de fabricación. Para ello se pueden seguir una serie de pasos que aseguran una práctica correcta: Primero se analizan todas las especificaciones de la pieza. Seguidamente se crean varios modelos en CAD, diseñando formas admisibles, y se le aplican las restricciones de fabricación necesarias (definidas por la herramienta, límites de peso, etc.). Para terminar se hace una validación de los modelos rediseñados, mediante un análisis por elementos finitos, o más directamente con la fabricación de la pieza real.
- Se ha comprobado que las nuevas herramientas informáticas de optimización, como el programa INSPIRE aquí utilizado, son de gran ayuda durante el proceso de rediseño, consiguiendo resultados más que aceptables y aplicables en los casos representados. Pero el criterio y conocimiento de un ingeniero con experiencia en diseño también son necesarios para elegir los modelos que mejor se adapten a los objetivos buscados.
- Siguiendo las fases de optimización referidas, y tras un análisis completo de la forma de la pieza y una larga serie de iteraciones de rediseño de los modelos iniciales, se ha conseguido optimizar la pieza inicial con un ahorro de masa del 34%, aun soportando las cargas y restricciones solicitadas inicialmente. Esto es un resultado a tener en cuenta, que incluso se podría mejorar con métodos más exhaustivos.
- Una comparación del proceso de fabricación entre la pieza original y la optimizada ha proporcionado conclusiones destacables. La evaluación de sus resultados indica que el método de FA proporciona un ahorro considerable de material utilizado para la fabricación (reflejado en el ratio de buy-to-fly), además de una reducción en el tiempo de fabricación total de más de 3 horas. Estos resultados verifican que una inversión para adaptar la fabricación de la pieza elegida mediante impresión 3D puede generar beneficios. En la tabla se presenta una comparación final de los parámetros y características de la pieza original y la optimizada.

Parámetro	Herraje original	Herraje optimizado
Masa total	127,3 g	84,5 g
Tensión máxima de Von Mises	509,9 MPa	713,2 MPa
Factor de seguridad	1,50	1,22
Desplazamiento máximo	0,14	0,27
Tiempo de fabricación	8 h	4 h y 16 min
Ratio buy-to-fly	0,71	0,93

Tabla 4. Resumen de comparación de parámetros inicial - optimizado.

10. LÍNEAS FUTURAS

Tras el análisis realizado en el presente proyecto, se plantean diferentes propuestas de mejora o aportación al estudio. Algunas de ellas vienen sugeridas a continuación.

- Variar el método de fabricación: Escogiendo un método distinto de fabricación aditiva (por ejemplo SLM) para generar la pieza seleccionada, se podrían conseguir diferentes resultados en cuestión de tiempos y costes, con lo que sería útil realizar una comparación representativa de los dos métodos.
- Análisis de distintos casos de carga: Cabe la posibilidad de añadir al estudio realizado unos nuevos casos de carga (cargas horizontales y oblicuas) que faltan por analizar. Así la pieza estaría simulada para todos los casos posibles y los resultados obtenidos serían más versátiles y útiles en todas las aplicaciones posibles.
- Fase de Optimización: Durante el proceso de optimización hay varias acciones que podrían conllevar un cambio en el diseño de la pieza final. El número de iteraciones de rediseño, el modelo de inicio pre-optimización, la selección de las zonas de seguridad y las de retirada de material... Todos estos factores aportarían modificaciones al que habría que valorar.
- Diferentes Materiales: El material elegido para la fabricación afecta al diseño optimizado, ya que la masa se reparte en el espacio dado dependiendo de su densidad. Por tanto, la posibilidad de definir un material de fabricación distinto de la aleación de titanio inicial, como por ejemplo el aluminio (material muy utilizado en aeronáutica por ser ligero y versátil), proporcionará diferentes posibilidades de diseño que pueden ser viables, incluso más convenientes.
- Interior en celosía: Un estudio alternativo se podría basar en la fabricación de la pieza con una estructura interior en celosía, con lo que el reparto de cargas variaría, y la optimización de la forma daría resultados muy distintos. Sería una buena comparación con la pieza modelada en el presente estudio, para comparar si este tipo de estructuras consiguen la misma rigidez con menos materia.

GLOSARIO

3DP: (Three Dimensional Printing) Impresión 3D - Proyección por Aglutinante

BTF (Buy-to-Fly ratio): relación entre el peso de la pieza final y la cantidad de material necesaria para su fabricación

CAD: (Computer-Aided Design) Diseño Asistido por Ordenador

DMLS: (Direct Metal Laser Sintering) Fusión Selectiva por Láser

EBM: (Electron Beam Melting) Fusión por Haz de Electrones

FA: Fabricación Aditiva

FDM: (Fused Deposition Modeling) Deposición de Hilo Fundido

HIP: (Hot isostatic pressing) Prensado isostático en caliente

LOM: (Laminated object manufacturing) Fabricación de Objetos por Laminación

PolyJet: Inyección (proyección) de Resina y Fotopolimerización por Luz Ultravioleta

SDL: (Selective Deposition Lamination) Deposición por Laminación Selectiva

SGC: (Solid Ground Curing) Fotopolimerización por Luz Ultravioleta

SLA: Solidificación de resina o Estereolitografía

SLM: (Selective Laser Melting) Fusión Selectiva por Láser

SLS: (Selective Laser Sintering) Sinterización Selectiva por Láser

BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas

- [1] Diegel O., Singamneni S., Reay S., Withell A., 2010. Tools for Sustainable Product Design: Additive Manufacturing, Journal of Sustainable Development, 3(3): 68-75.
- [2] Chang K.-H., Tang P.-S., 2001. Integration of design and manufacturing for structural shape optimization, Advances in Engineering Software, 32(7): 555-567.
- [3] B. Vayre, F. Vignat, F. Villeneuve, 2012. Designing for Additive Manufacturing. Procedia CIRP 3: 632 – 637
- [4] Fabricación Aditiva – Fundación COTEC para la innovación tecnológica (Documentos COTEC sobre oportunidades tecnológicas) ISBN: 978-84-92933-15-0 (2011)
- [5] Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda – AM Platform (2013)
- [6] Manual Sistemas de Rapid Prototyping – Axis Multimedia (2013)
- [7] Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-5)
- [8] M. G. del Rio Cidoncha, M. E. Martínez Lomas, J. Martínez Palacios, S. Pérez Díaz. 'El libro de CATIA V5. Módulos Part Design, Wireframe & Surface Design, Assembly Design y Drafting'. Año 2007.
- [9] Material Properties of EBM.Manufatured Ti6Al4V & Ti6Al4V ELI under RAW and HIO conditions. Mattias Svensson (Arcam AB). 2009.
- [10] Khalid Rafi. H, Karthik N.V, Thomas L. Starr*, Brent E. Stucker. August 2012. Mechanical property evaluation of Ti-6Al-4V parts made using Electron Beam Melting. Department of Industrial Engineering, *Department of Chemical Engineering, J. B. Speed School of Engineering, University of Louisville, Louisville, KY 40292.
- [11] HyperWorks 13.0. OptiStruct User's Guide. 2014.
- [12] E. F. Bruhn 'Analysis and Design of Flight Vehicle Structures'
- [13] Airframe Structural Design – Michael Chun-Yung Niu

Referencias digitales

- [14] Web de la casa comercial Arcam: <http://www.arcam.com/>
- [15] Interempresas.net – 'La fabricación aditiva. La evidencia de una necesidad': <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/116342-La-fabricacion-aditiva-La-evidencia-de-una-necesidad.html>
- [16] Web oficial del Comité ASTM Internacional: <http://www.astm.org/>



[17] Web de la empresa ALTAIR, creador de software dirigido a la ingeniería y la tecnología:
<http://www.altairhyperworks.co.uk/Product,60,solidThinking%20Inspire.aspx>

[18] Web de la empresa Dassault Systèmes, distribuidor del software CATIA:
<http://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/>



ANEXO 1: Cálculo de la carga aplicada

El herraje elegido para el presente estudio forma parte de la instalación de la toma de aire de un avión comercial. El mismo herraje está instalado en diferentes puntos de la estructura de la aeronave, viéndose sometido a distintas cargas y sollicitaciones, dependiendo de la posición del elemento de unión al que está ensamblado. Para un diseño óptimo del herraje, se va a realizar el análisis considerando uno de los casos posibles: que se vea sometido a una carga estática axial. Esta carga no es conocida, ya que, como se ha mencionado, el herraje actúa en la estructura sometido a distintos casos de carga. Por lo tanto, para el estudio general que nos concierne, se va a calcular una carga aplicada máxima admisible. Es calculada aproximadamente a partir de los estándares de diseño de uniones en orejetas, expuestos en [12], siendo la máxima admisible que puede ser soportada por el herraje según su geometría y el material de fabricación.

En el libro de E. F. Bruhn “Analysis and Design of Flight Vehicle Structures” ([12] – Apdo. D1.10) se propone el método general de análisis de una unión de este tipo bajo carga axial. En la unión, la orejeta se ve afectada por fallo a tracción, a cortadura y aplastamiento. Se calculan todos los fallos para obtener la carga crítica. Además hay que aplicarle un factor de seguridad típico para este tipo de estructuras aeronáuticas.

Fallo a tracción

En la Figura A1.1 se representa el fallo a tracción, cuando la placa de unión rompe por la sección central del agujero debido a las tensiones de tracción. Se puede ver en la ecuación 1, según Bruhn, que la carga aplicada máxima admisible se calcula multiplicando la resistencia a tracción (F_{tu}) por el área del agujero afectada por la tracción.

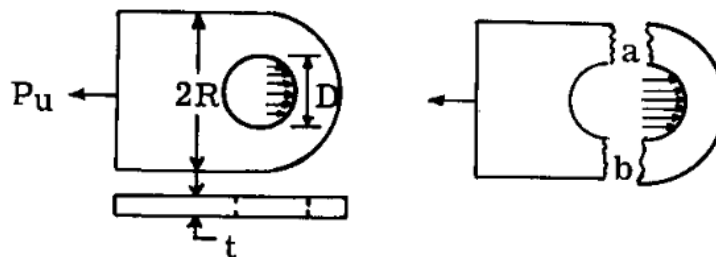


Figura A1.1. Representación esquemática del fallo a tracción

$$P_{u(tracción)} = F_{tu} \cdot (2R - D) \cdot t \quad (1)$$

Donde F_{tu} es la resistencia a la tracción del material, $2R$ es el ancho de base de la orejeta, D es el diámetro del agujero y t el espesor de la placa.

Con esta ecuación se asume que la tensión en la sección de contacto es uniforme, pero este planteamiento no es realista, ya que el flujo de carga en el agujero causa concentración de tensiones. Por tanto es necesario aplicar al resultado un margen de seguridad de un 25% para que esta concentración de tensiones quede cubierta

Teniendo en cuenta la geometría de la orejeta del herraje (reflejadas en la Figura A1.1), y la tensión de rotura del Ti-6Al-4V fabricado a partir de fabricación aditiva EBM (representadas en la Tabla 1), el cálculo de la carga última por tensión es:

$$P_{u (tracción)} = 942 \cdot (2 \cdot 16 - 16,67) \cdot \frac{6,1}{1,25} = 70471,39 \text{ N}$$

Fallo a cortadura

También es necesario estudiar el fallo a cortadura, que es el que se produce por desgarro de una sección de la orejeta se rompe debido a las tensiones producidas por el pasador (ver Figura A1.2). La ecuación 2 calcula la carga admisible a cortadura:

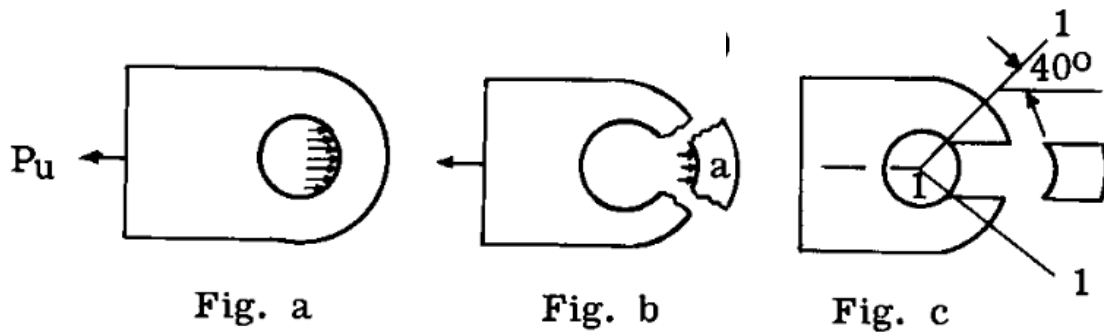


Figura A1.2. Representación esquemática del fallo a cortadura

$$P_{u (cortadura)} = F_{su} \cdot R \cdot t \cdot 2 \quad (2)$$

Donde F_{su} es la resistencia a cortadura del material, R es la distancia efectiva al borde del material, y t el espesor de la placa. Esta área de cortadura calculada es muy conservativa, normalmente se usa el área representada en la Figura A1.2 (c), limitada por una línea a 40°.

En este caso el valor de la carga mínimo a la que se produce el fallo a cortadura sería:

$$P_{u (cortadura)} = 592,94 \cdot 16 \cdot 6,1 \cdot 2 = 115741,89 \text{ N}$$

Fallo a aplastamiento

Este fallo se produce en la zona de la placa adyacente al elemento de fijación. La carga P hace que el perno presione la pared de la placa, y si esta presión es lo suficientemente alta, el agujero comenzará a deformarse y alargarse, como se puede ver en la Figura A1.3.

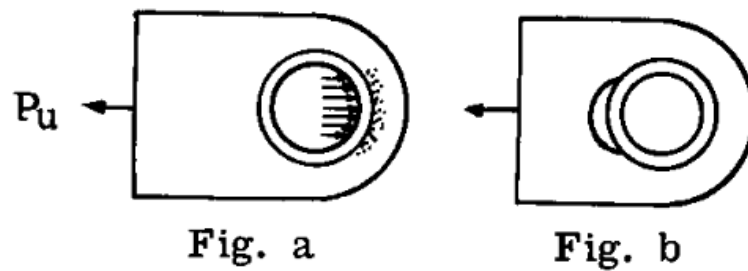


Figura A1.3. Representación esquemática del fallo por aplastamiento

La ecuación de cálculo de la carga mínima necesaria para que se produzca este fallo es la siguiente:

$$P_u (\text{aplastamiento}) = F_{br} \cdot D \cdot t \quad (3)$$

Donde F_{br} es la resistencia a aplastamiento del material, D es el diámetro del agujero y t el espesor de la placa. Es recomendable aplicar a esta ecuación un factor de seguridad del 1,5. Por tanto, para el diseño del herraje de este estudio, la carga por aplastamiento sería:

$$P_u (\text{aplastamiento}) = \frac{1385,85}{1,5} \cdot 16,67 \cdot 6,1 = 93948,62 \text{ N}$$

Fuerza axial aplicada

La fuerza crítica aplicada al herraje será la mínima admisible de entre las tres calculadas por los fallos anteriores (en las ecuaciones 1, 2 y 3). Se aplica un factor de seguridad de 1,15, que es el establecido por la FAA (administración federal de aviación) americana para análisis estructural en aviación civil. En este caso, la mínima es la producida por fallo a tracción (70471,39 N), con lo que esta será la carga aplicada considerada para el análisis del herraje.

$$F_a = \frac{70471,39}{1,15} = 61279,47 \text{ N}$$

Fuerza lateral aplicada

Además de la fuerza axial calculada anteriormente, se debe añadir una carga lateral para considerar posibles desajustes en la unión y movimientos de la pieza. Esta carga habitualmente se considera un 10% de la carga axial aplicada. Por lo tanto, la carga lateral aplicada es:

$$F_l = 61279,47 \cdot 0,1 = 6127,95 \text{ N}$$

Empleo de la carga

La carga calculada anteriormente se aplica en los modelos a analizar (diseñados en el apartado 4) para realizar el proceso de optimización. Al ejecutar dicha operación se comprueba que las configuraciones obtenidas no son capaces de soportarla, se crean tensiones que superan las máximas límite del material (868 MPa). Esto es debido a que la carga máxima se ha definido en función de la unión móvil (orejeta), pero las tensiones aparecen en los agujeros de los remaches de la base.

Teniendo esta premisa en cuenta, se ha recurrido a realizar el análisis de la pieza original para comprobar cuál es la fuerza máxima que soporta y verificar que es menor que la máxima calculada en el apartado anterior. Para ello se ha analizado la pieza repetidas veces, variando la magnitud de la carga aplicada (nunca superando la máxima de 61279,47 N). Se han realizado iteraciones hasta alcanzar un factor de seguridad de 1,5, que garantice el buen funcionamiento de las uniones sin sufrir daños, entre un rango de entre 2000 y 5000 N (carga aproximada para herrajes en el mercado, de la misma magnitud y material).

El estudio descrito se realiza con la herramienta INSPIRE®, y las condiciones del análisis son similares a las que se han tenido en cuenta para la optimización de modelos en el apartado 4, y son las siguientes:

- Se han considerado soportes empotrados con el giro libre en los agujeros de los remaches de la base.
- Las cargas aplicadas constan de cuatro casos de carga: dos casos con carga a tracción con cargas laterales del 10% de la carga principal (en sentidos contrarios), y dos casos a compresión con sendas cargas laterales.
- El material de la pieza es Ti-6Al-4V AMS 4992.
- La división del mallado de la pieza se hace en elementos de 1 mm de lado.
- Se ha tenido en cuenta el efecto de la gravedad.

Tras varias iteraciones se obtiene una carga aceptable de 2750 N, con factor de seguridad de 1,5, y tensiones máximas obtenidas de 509,9 MPa (ver resultados completos del análisis en el Anexo 2). Por tanto, estas serán las cargas consideradas en el estudio de optimización de los modelos (apartado 4): 2750 N de carga axial y 275 de carga lateral (10% de la carga axial).

ANEXO 2: HERRAJE ORIGINAL. ANÁLISIS.

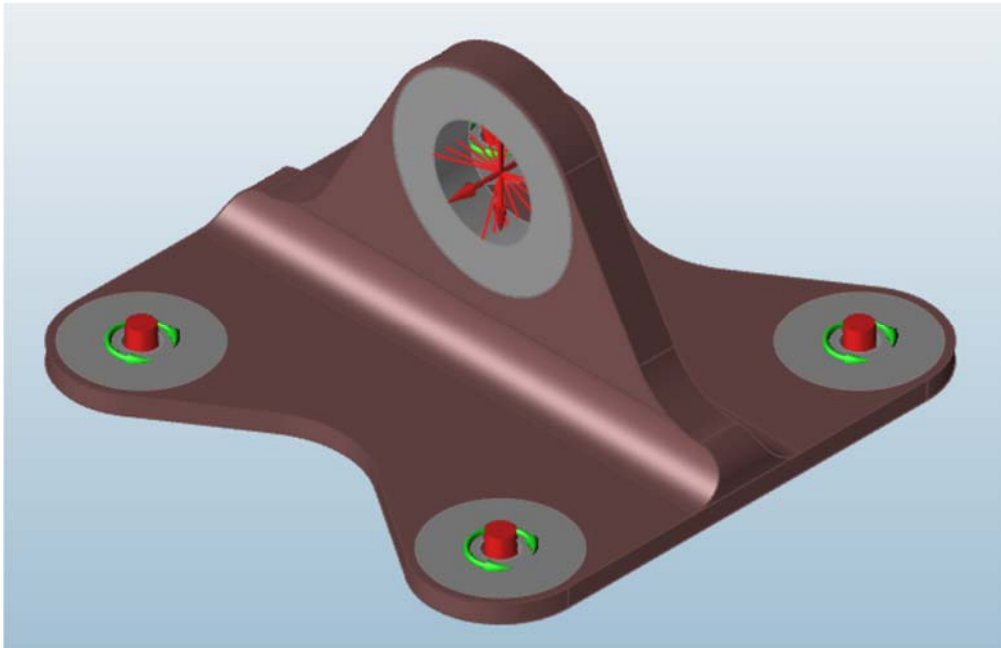


Figura A2.1. Herraje original. Modelo con cargas y restricciones aplicadas.

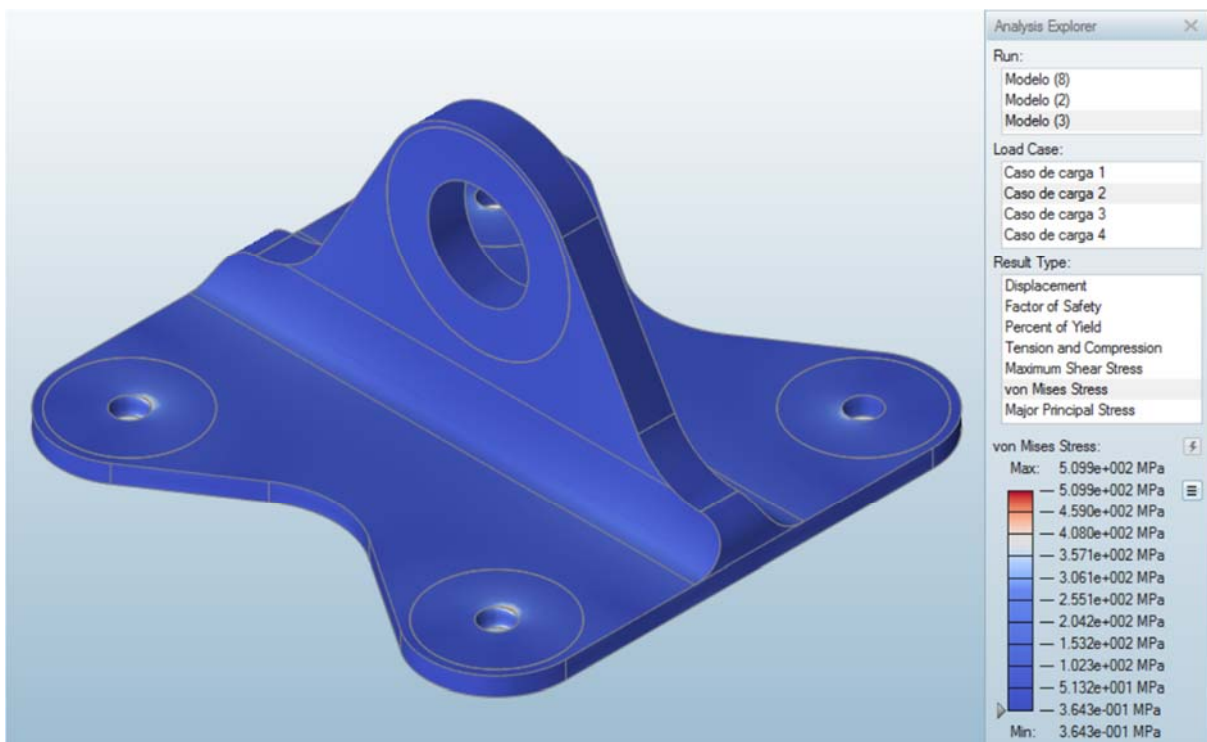


Figura A2.2. Herraje original. Tensión de Von Mises.

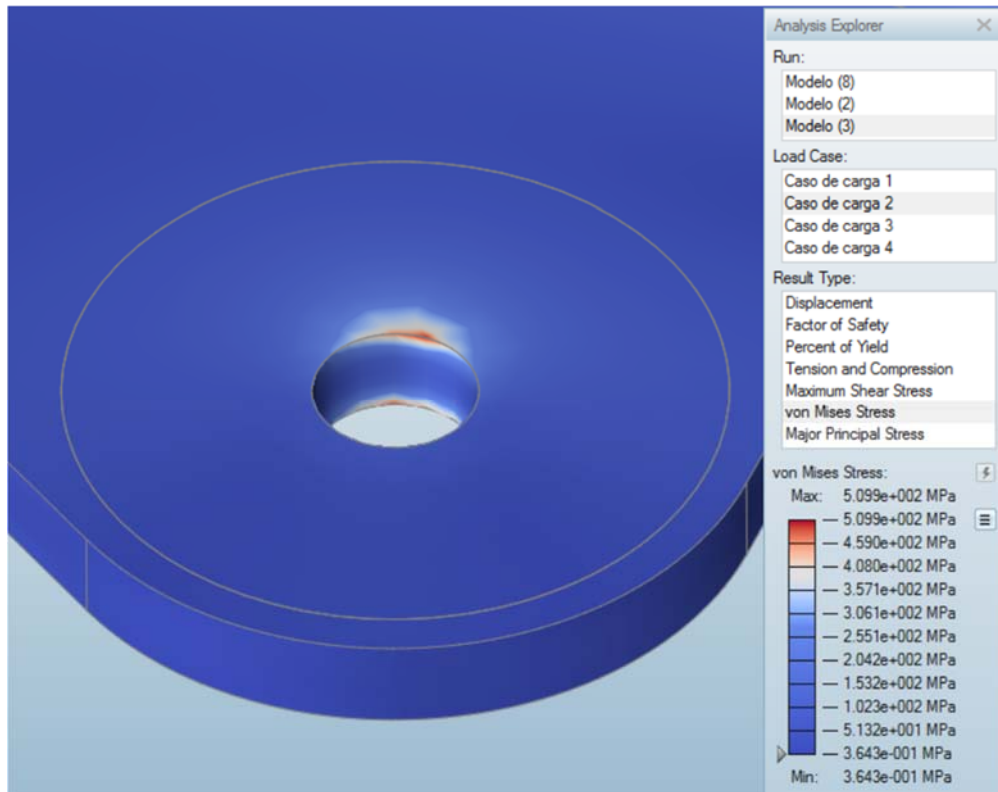


Figura A2.3. Herraje original. Detalle máxima tensión de Von Mises.

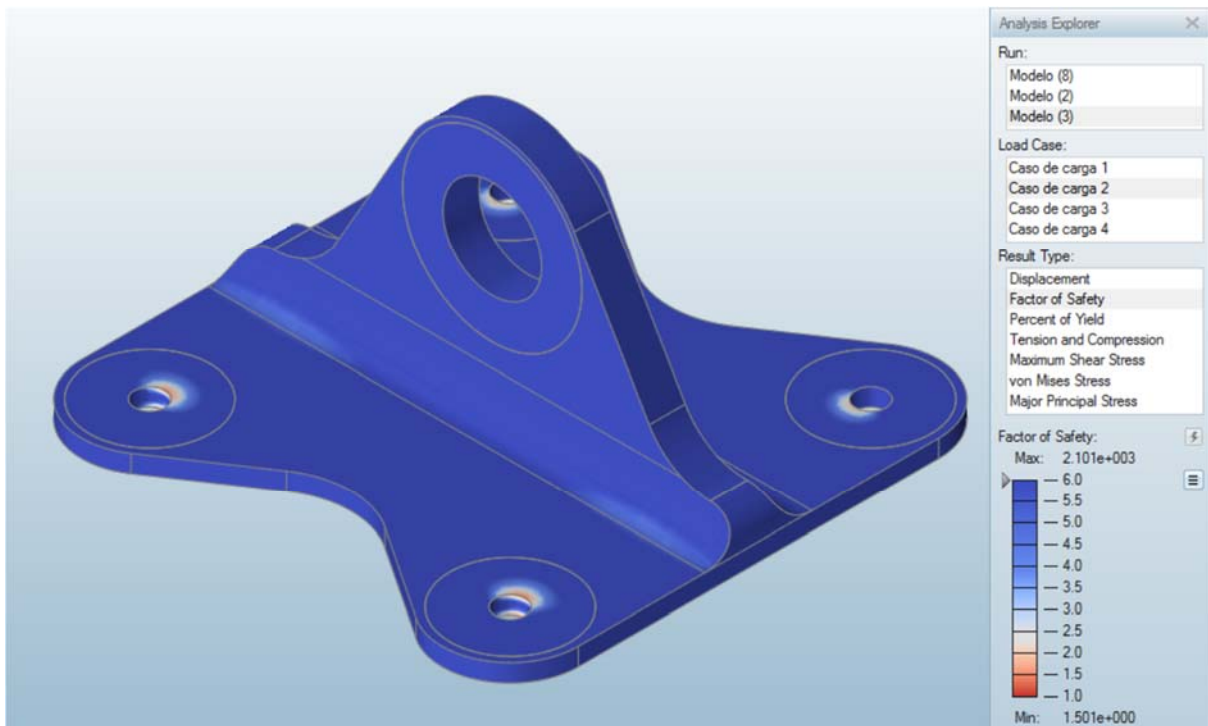


Figura A2.4. Herraje original. Factor de seguridad.

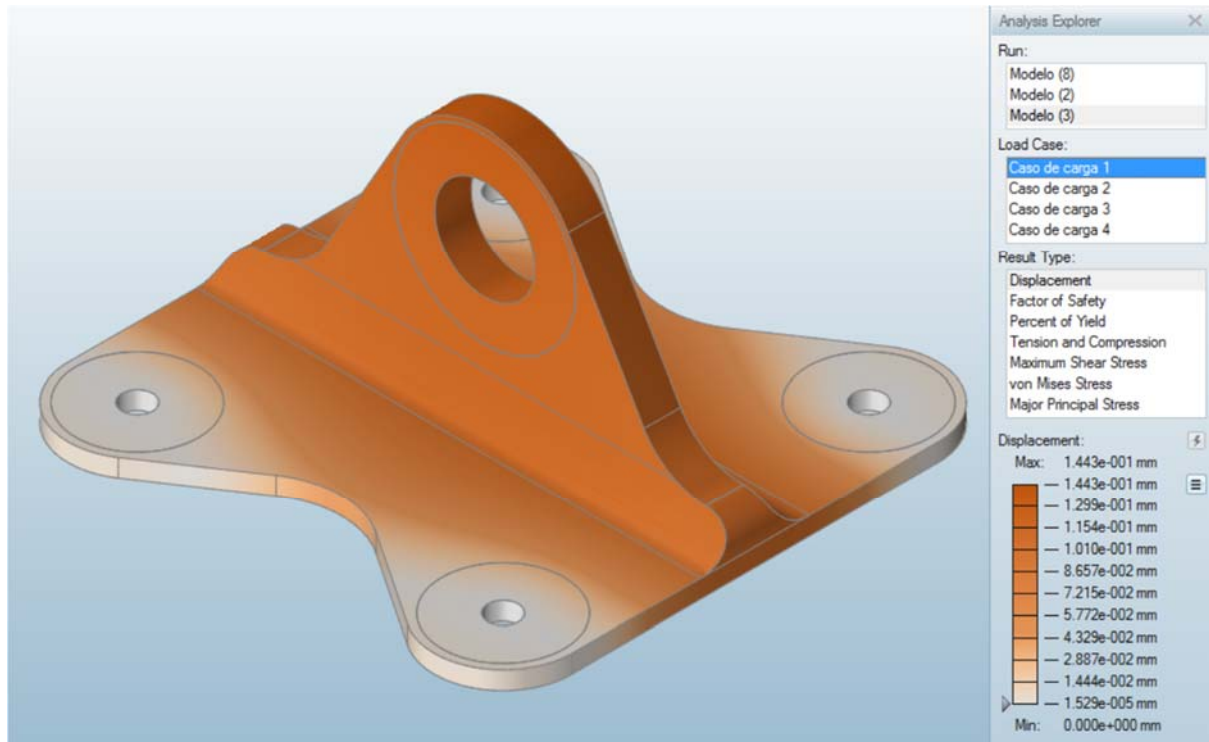


Figura A2.5. Herraje original. Desplazamiento máximo.

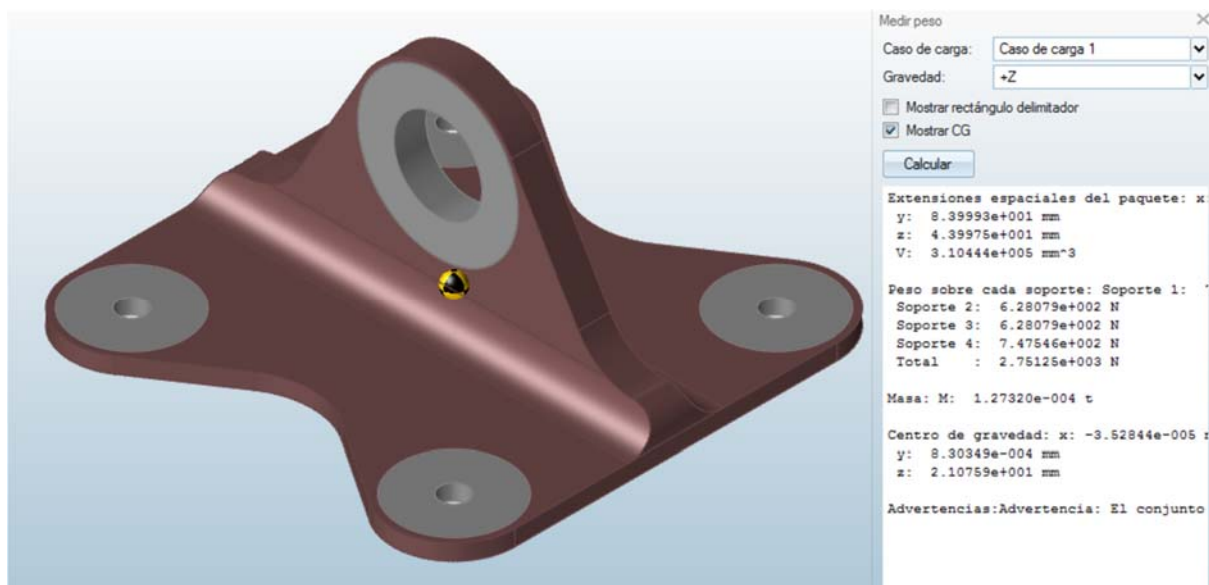


Figura A2.6. Herraje original. Cálculo de masa.

ANEXO 3: PIEZAS ORIGINALES IMPLICADAS EN LA UNIÓN – VISTAS.

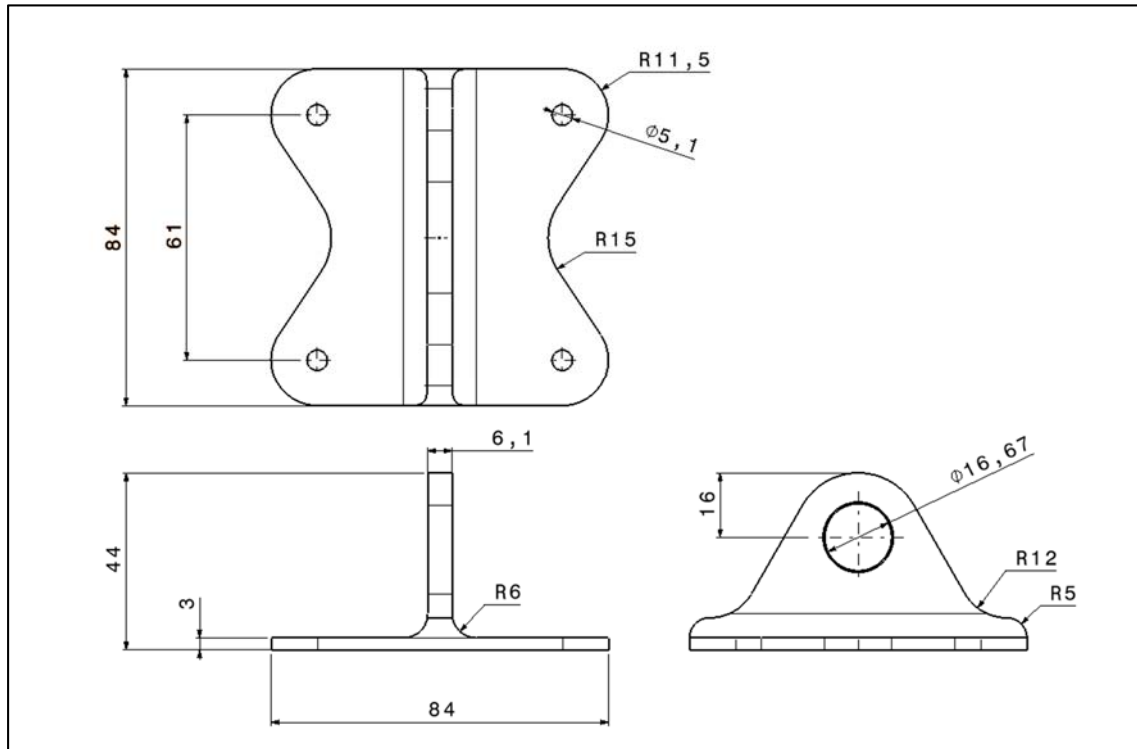


Figura A3.1. Herraje macho. Vistas y medidas.

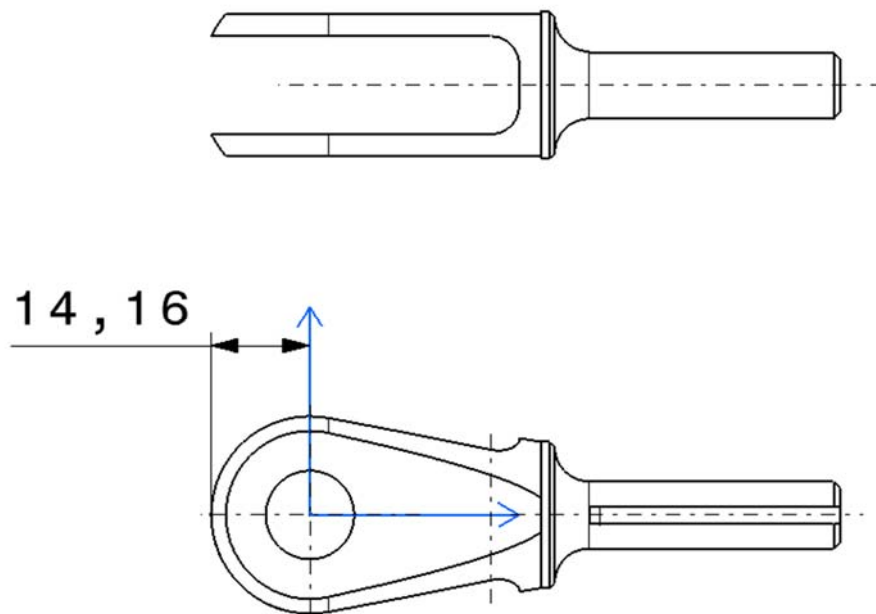


Figura A3.2. Herraje hembra. Vistas y medidas.

ANEXO 4: Modelo 1 - Perfil en T. Optimización al 30% de volumen y análisis.

Optimización del Modelo 1 mediante el programa INSPIRE®, al 30% del volumen total del espacio de diseño.

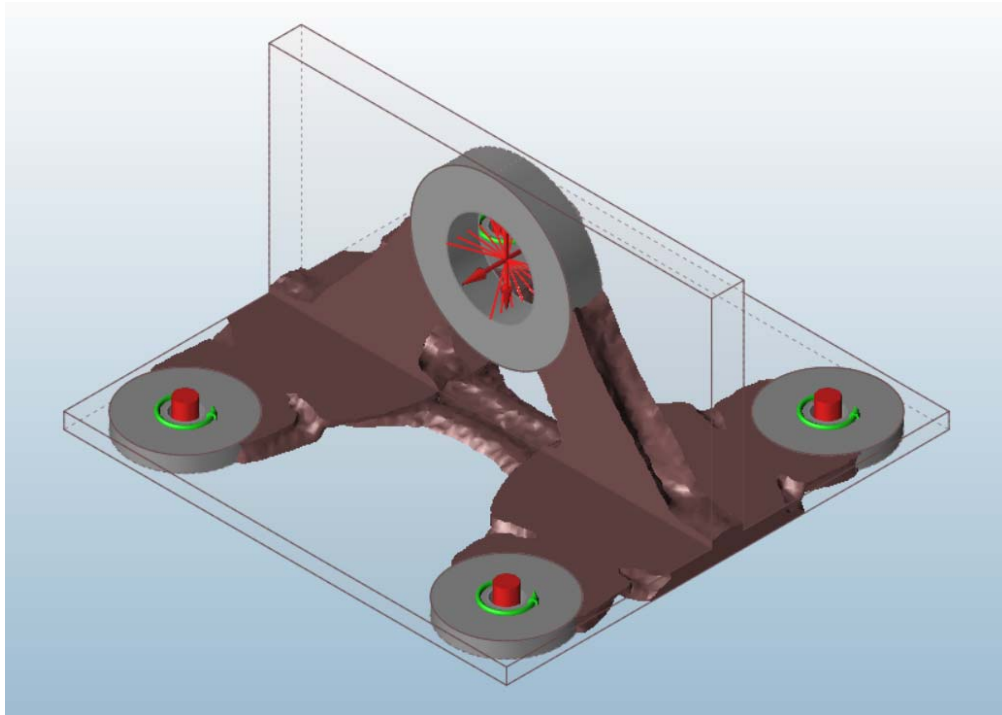


Figura A4.1. Modelo 1 optimizado.

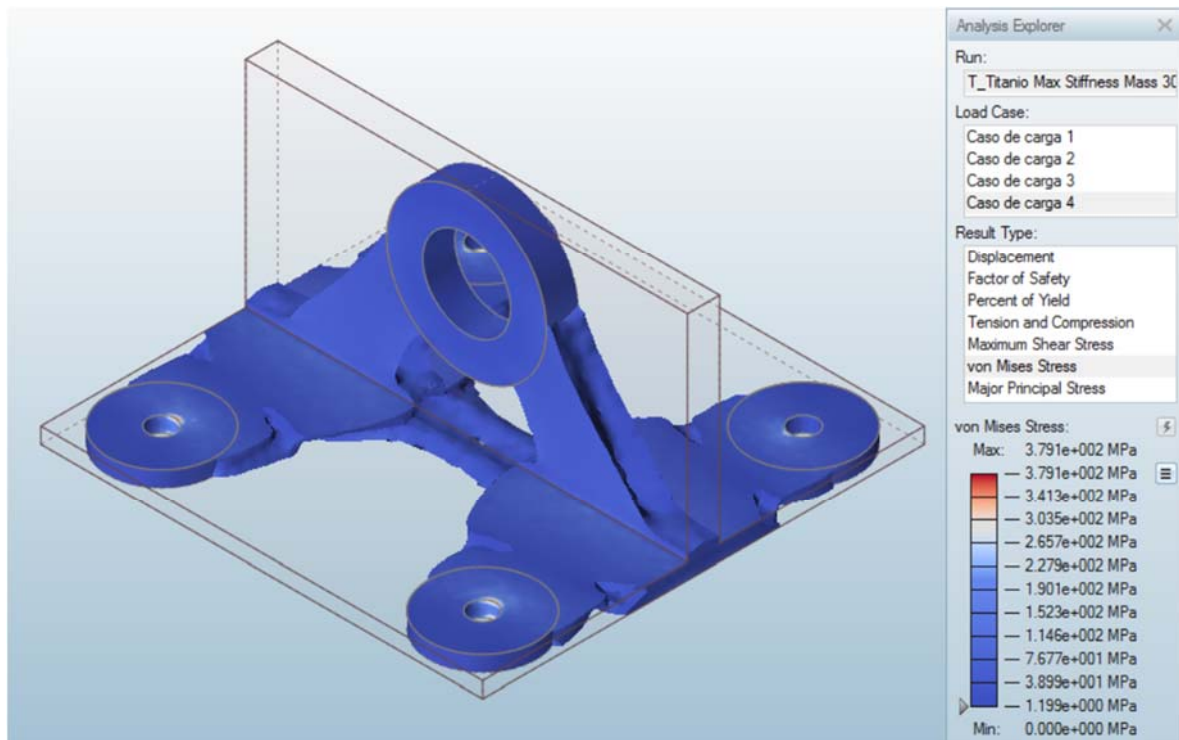


Figura A4.2. Modelo 1 optimizado. Tensiones de Von Mises.

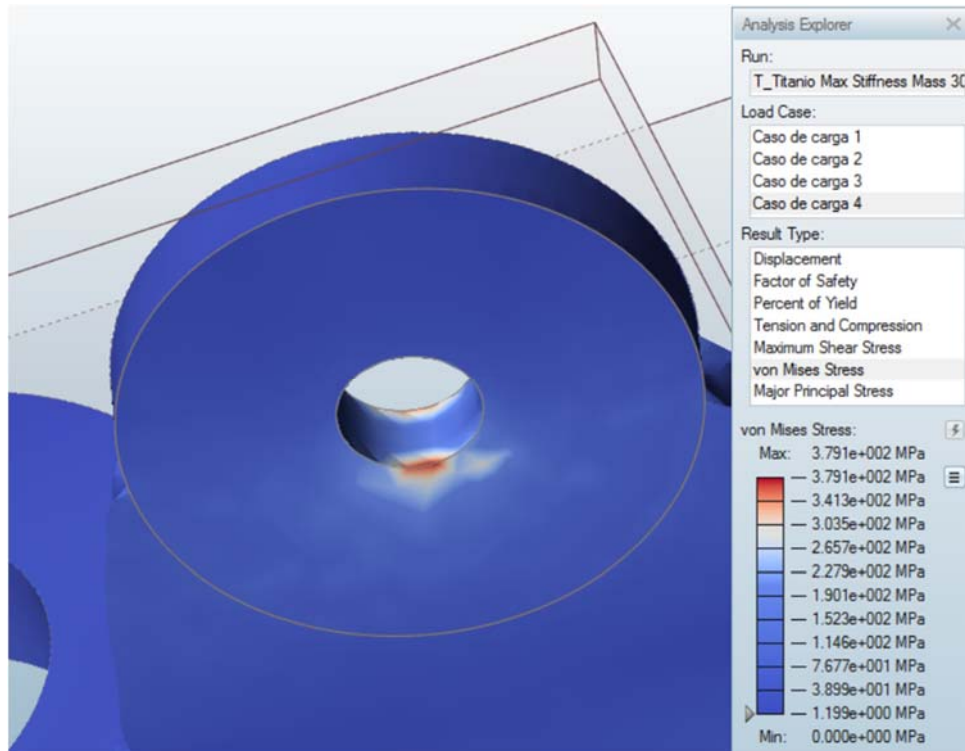


Figura A4.3. Modelo 1 optimizado. Detalle de tensión máxima de Von Mises.

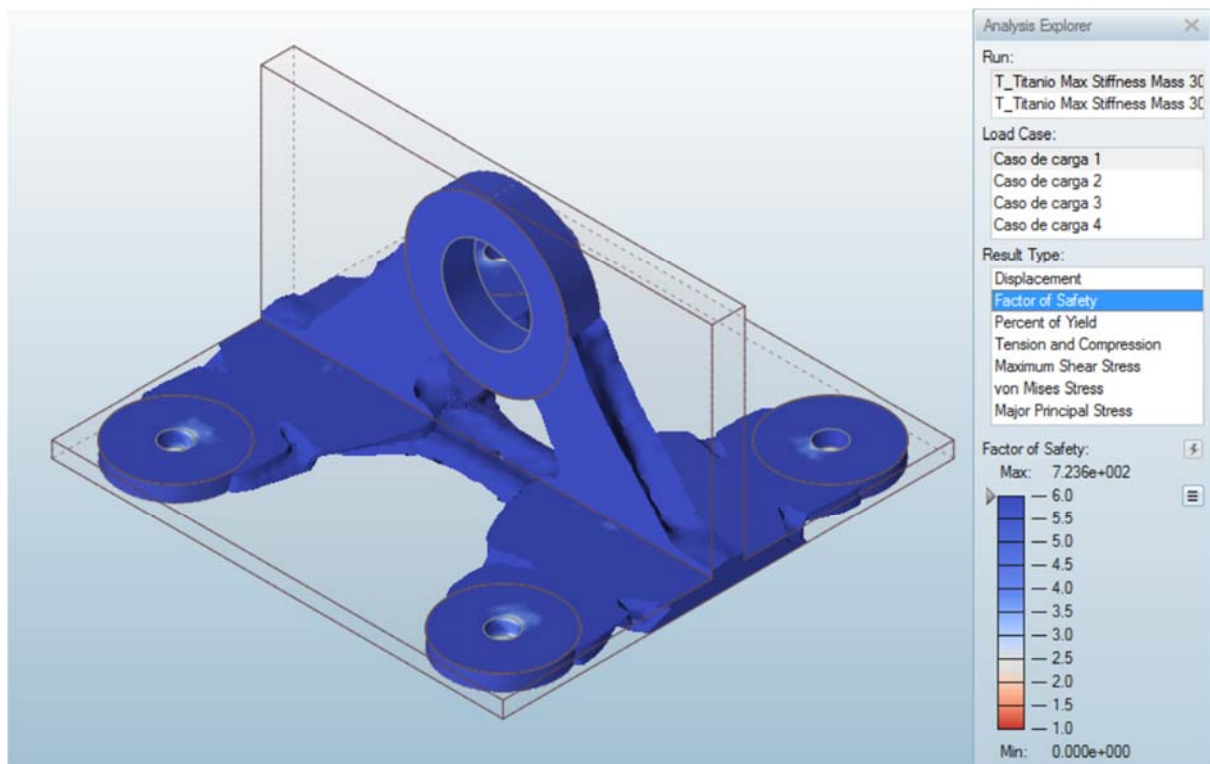


Figura A4.4. Modelo 1 optimizado. Factor de seguridad.

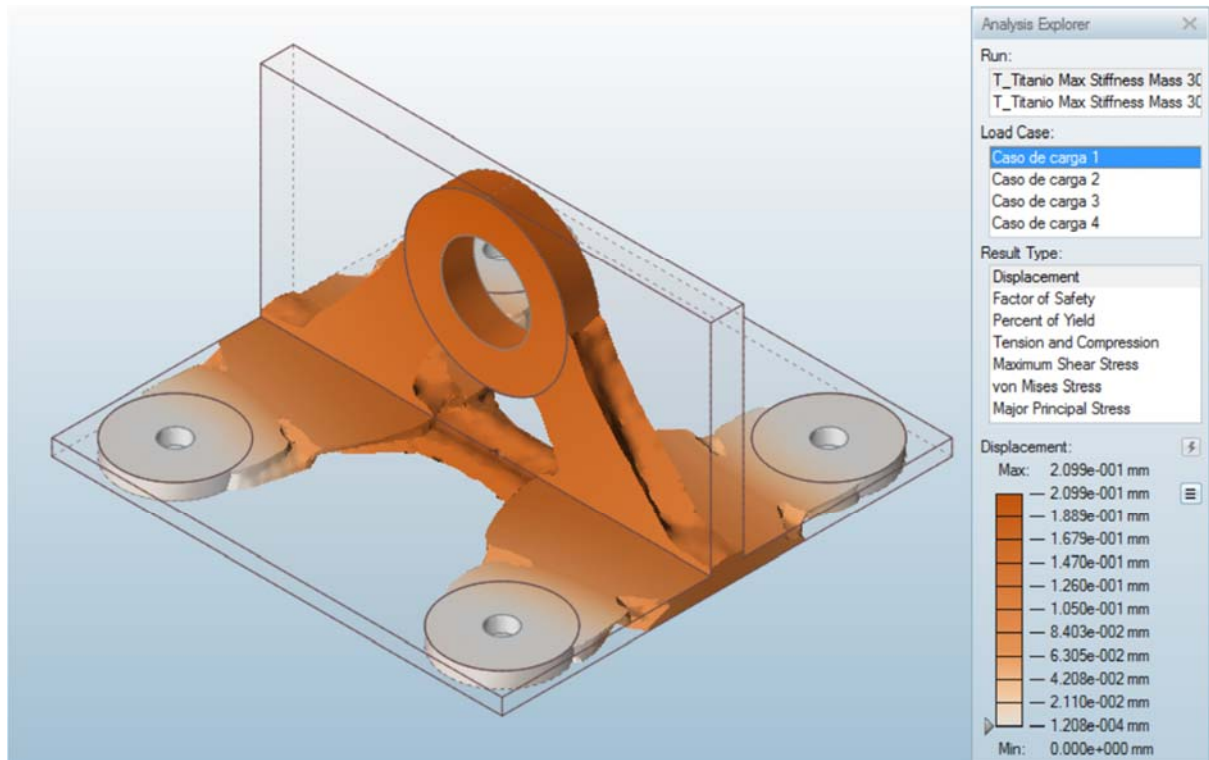


Figura A4.5. Modelo 1 optimizado. Desplazamiento máximo.

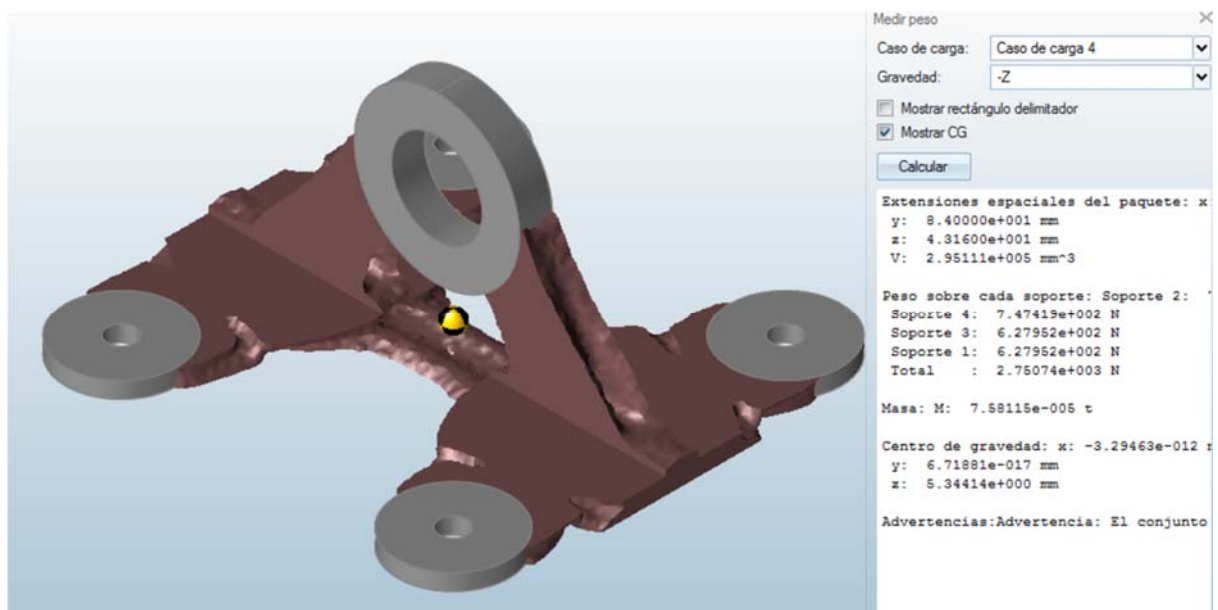


Figura A4.6. Modelo 1 optimizado. Cálculo de masa.

ANEXO 5: Modelo 2 - Base en bloque. Optimización al 30% de volumen y análisis.

Optimización del Modelo 1 mediante el programa INSPIRE®, al 30% del volumen total del espacio de diseño.

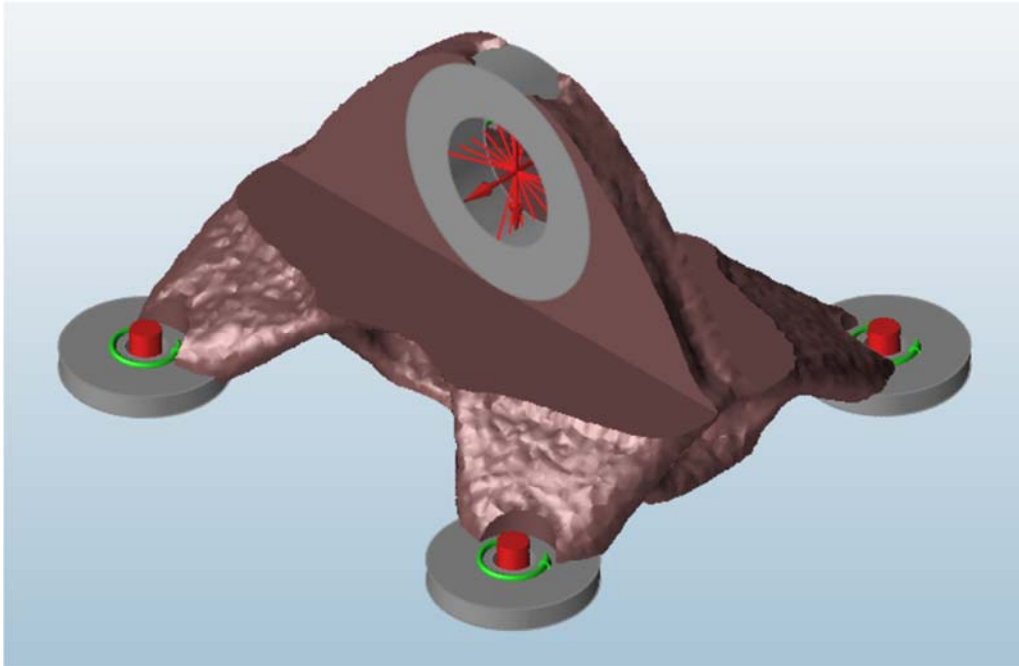


Figura A5.1. Modelo 2 optimizado.

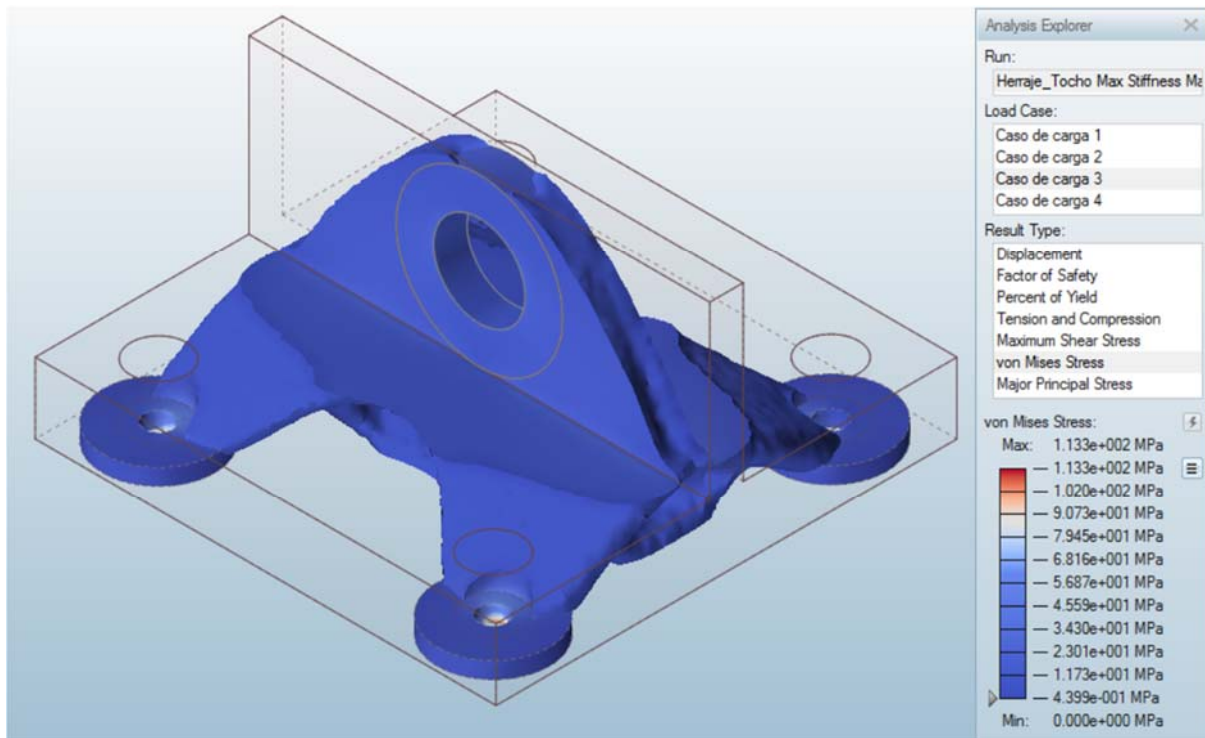


Figura A5.2. Modelo 2 optimizado. Tensiones de Von Mises.

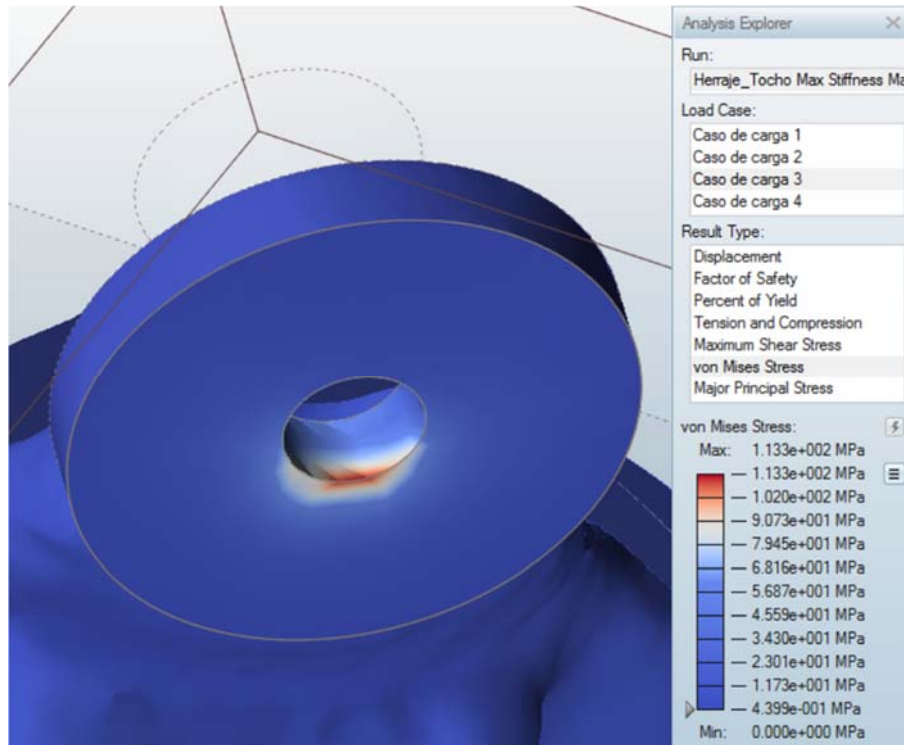


Figura A5.3. Modelo 2 optimizado. Detalle de tensión máxima de Von Mises.

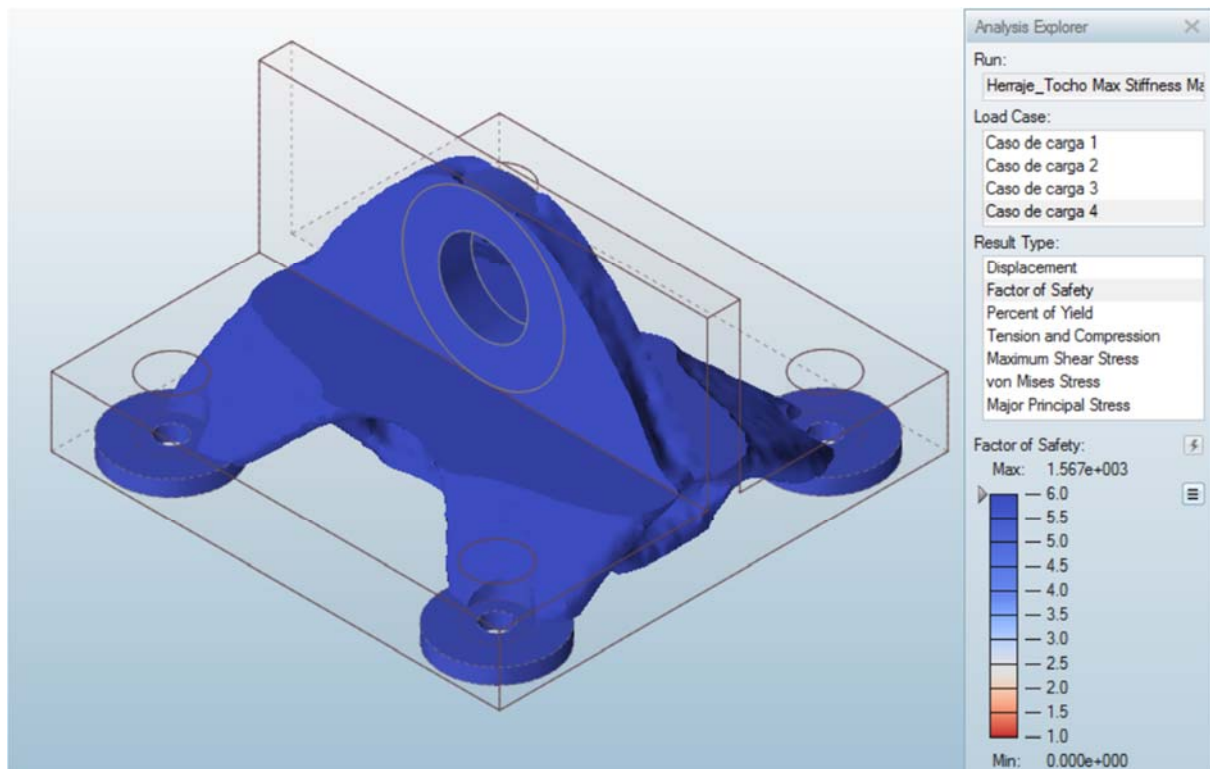


Figura A5.4. Modelo 2 optimizado. Factor de seguridad.

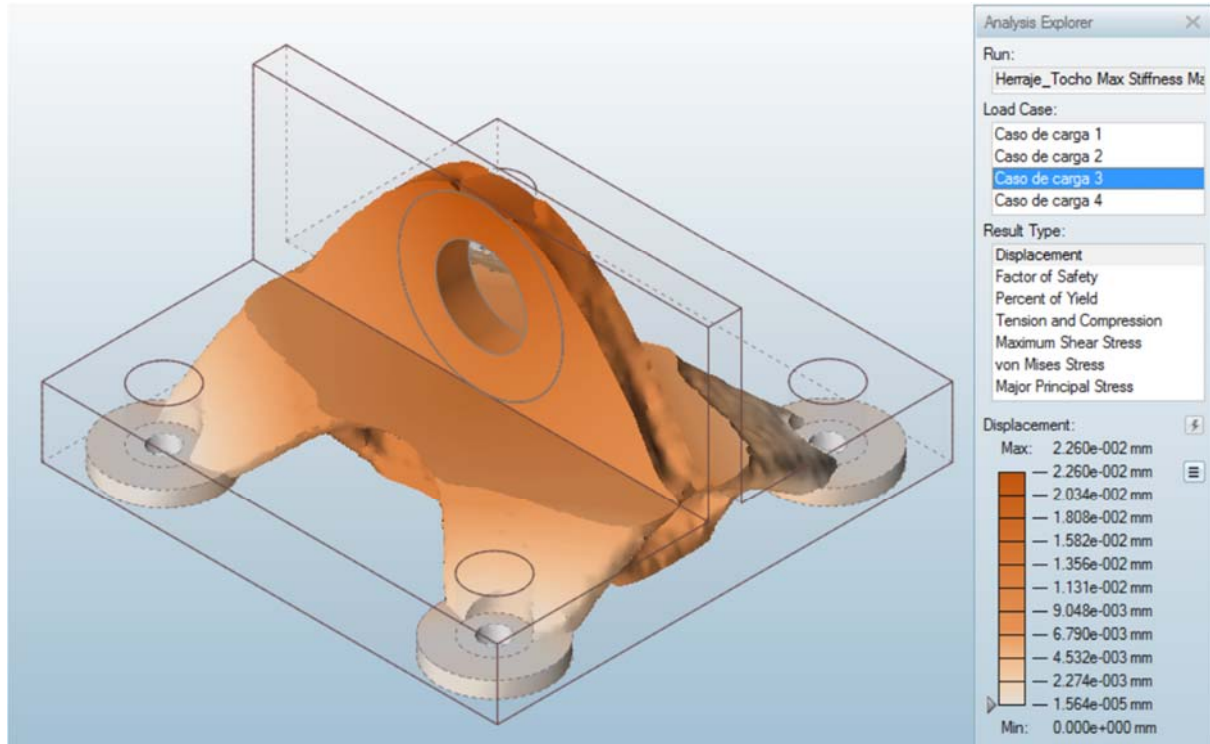


Figura A5.5. Modelo 2 optimizado. Desplazamiento máximo.

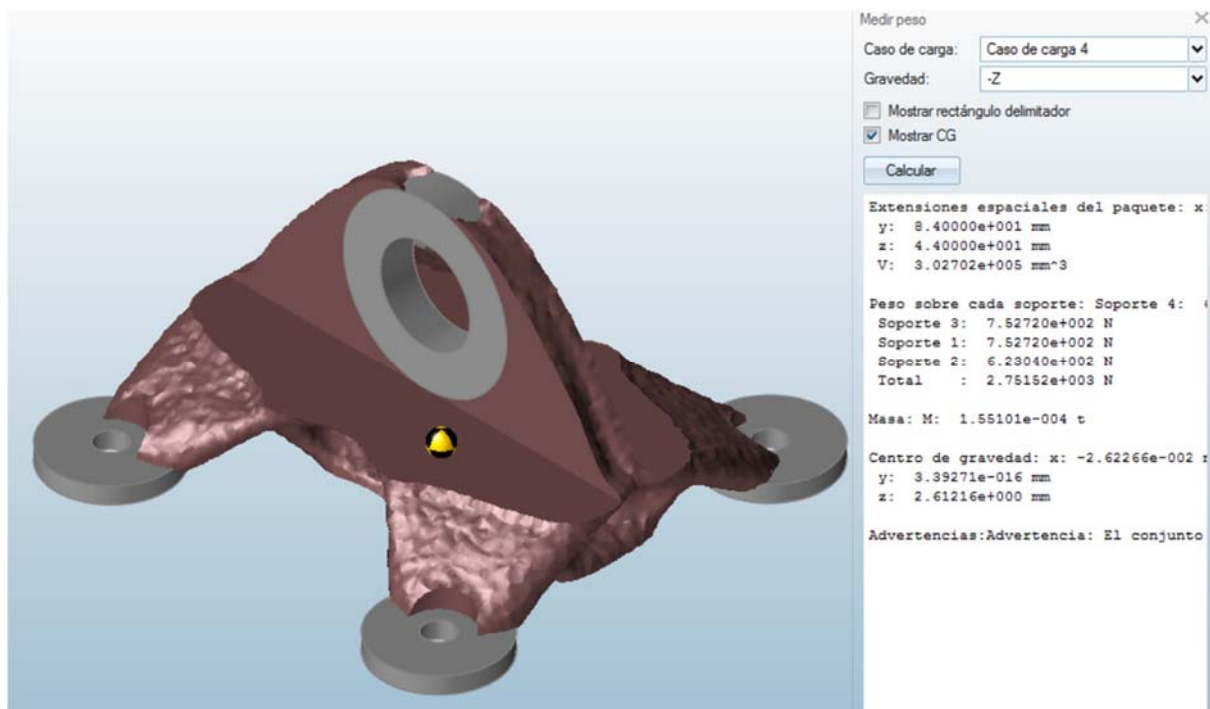


Figura A5.6. Modelo 2 optimizado. Cálculo de la masa del conjunto.

ANEXO 6: Modelo 2 - Base en bloque. Optimización al 20% de volumen y análisis.

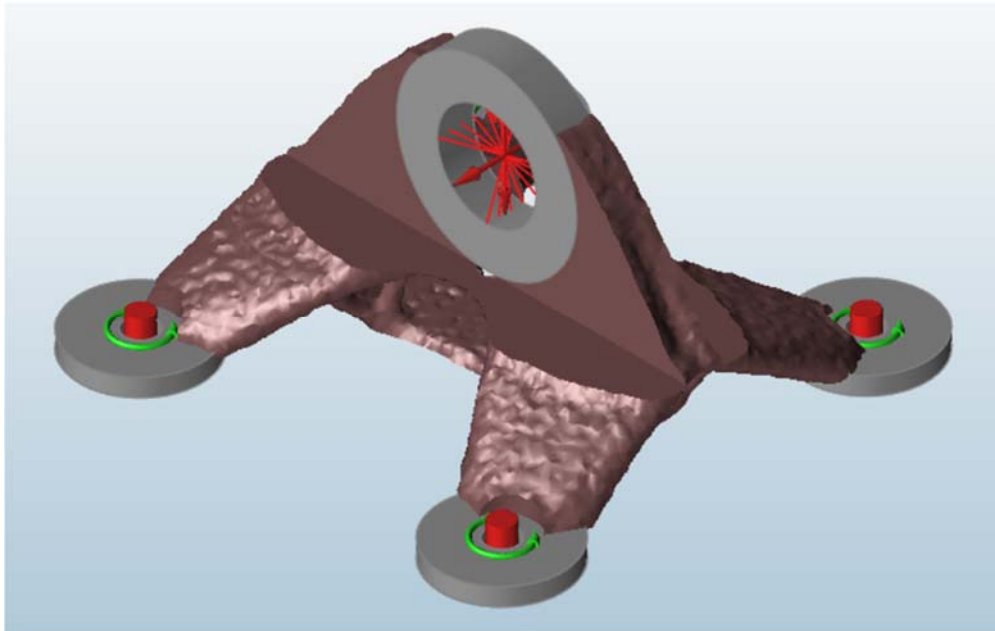


Figura A6.1. Modelo 2 optimizado al 20%.

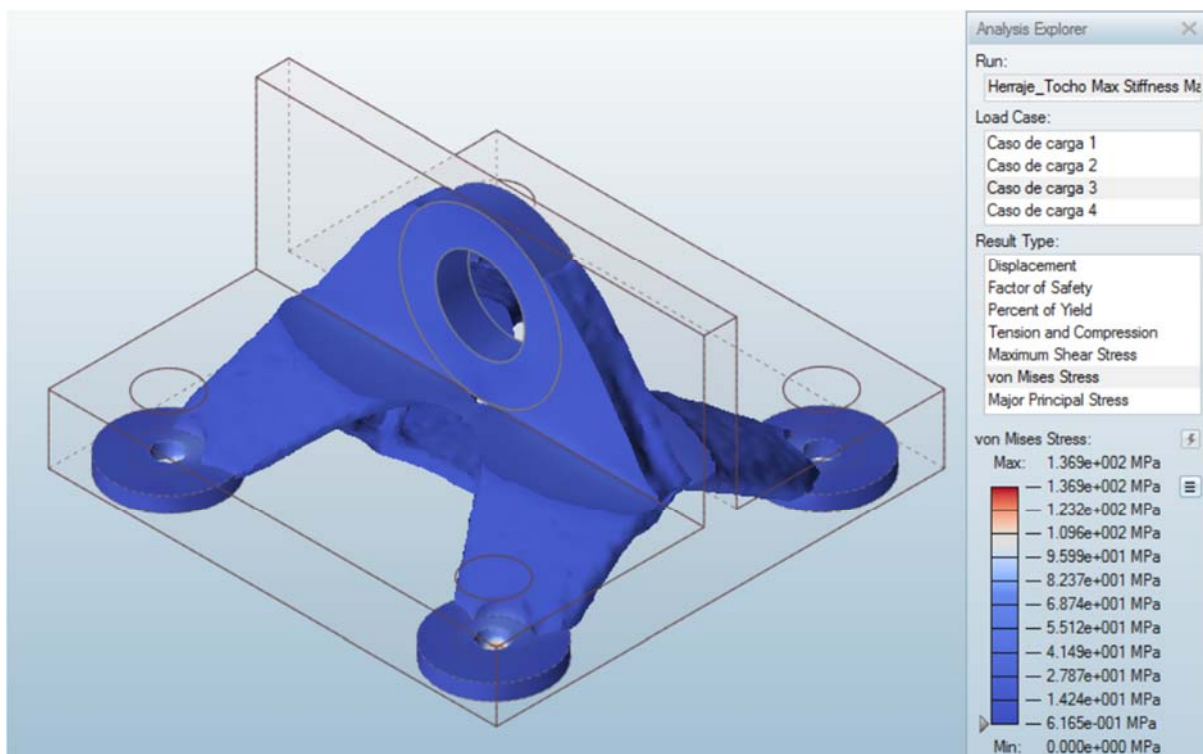


Figura A6.2. Modelo 2 optimizado al 20%. Tensiones de Von Mises.

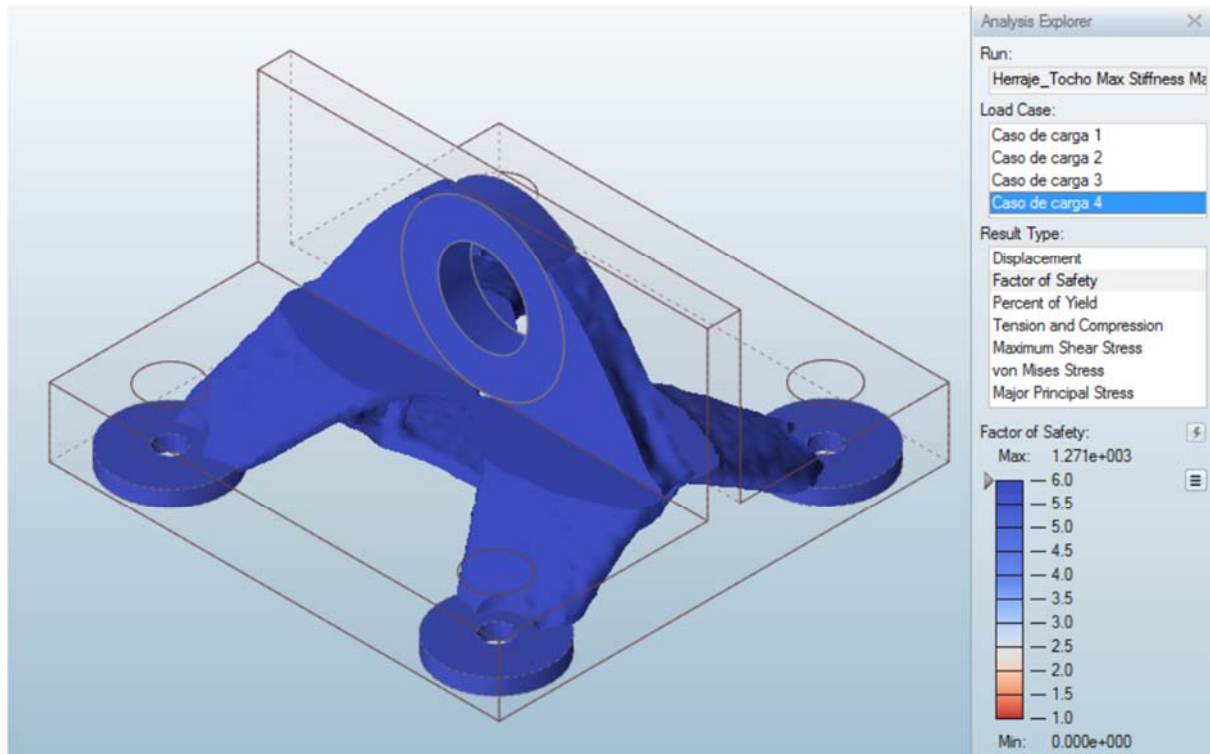


Figura A6.3. Modelo 2 optimizado al 20%. Factor de seguridad.

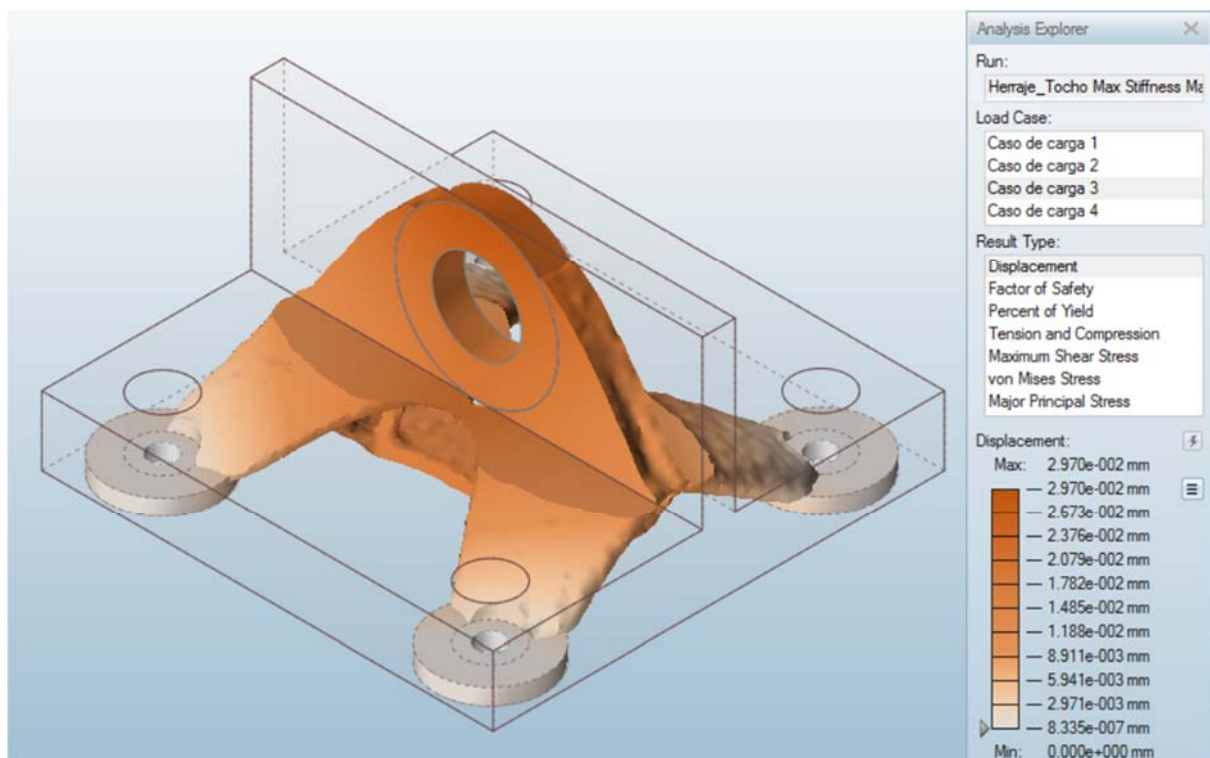


Figura A6.4. Modelo 2 optimizado al 20%. Desplazamiento máximo.

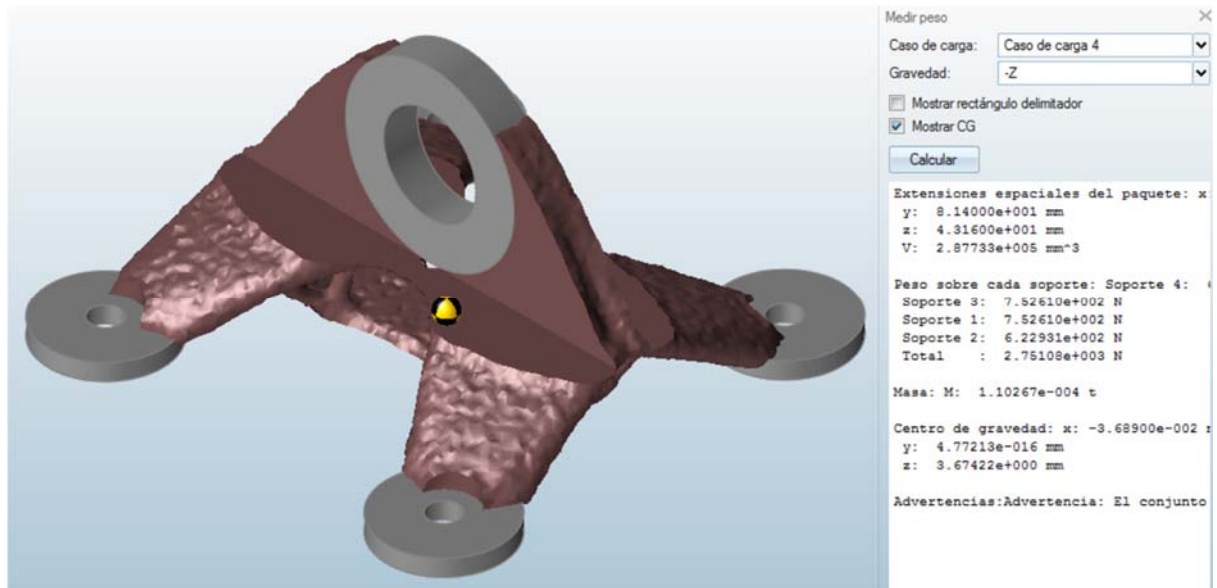


Figura A6.5. Modelo 2 optimizado al 20%. Cálculo de masa.

ANEXO 7: Modelo ajustado. Análisis.

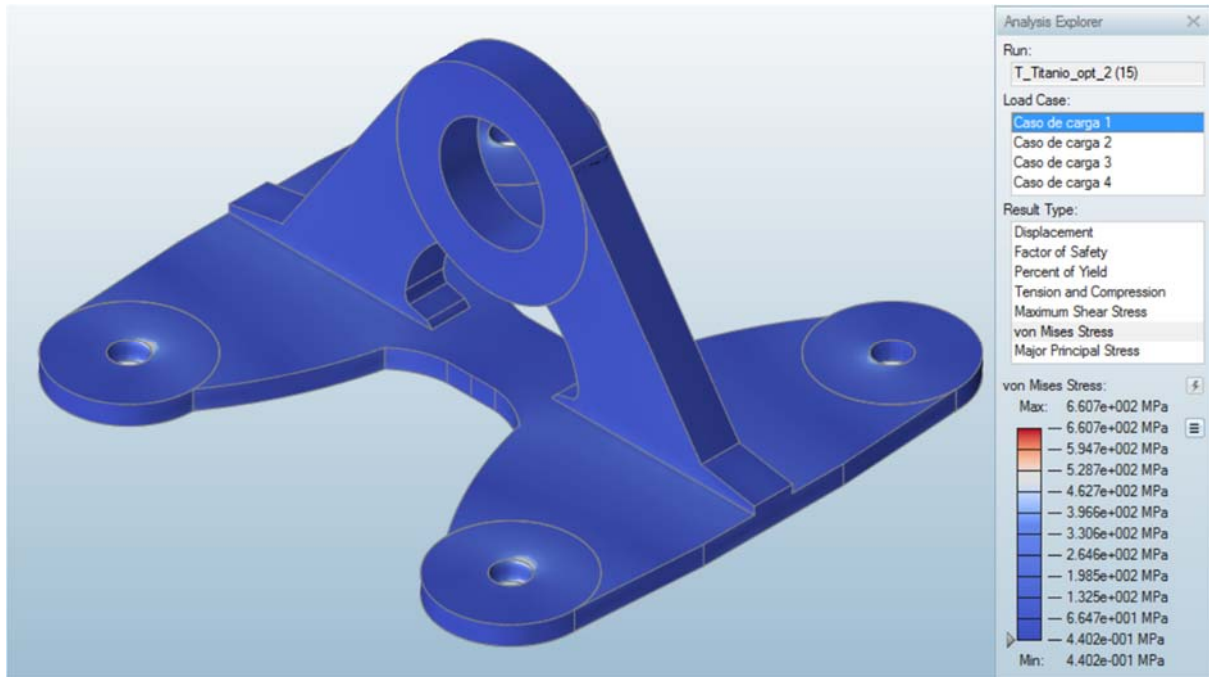


Figura A7.1. Modelo ajustado. Tensiones de Von Mises.

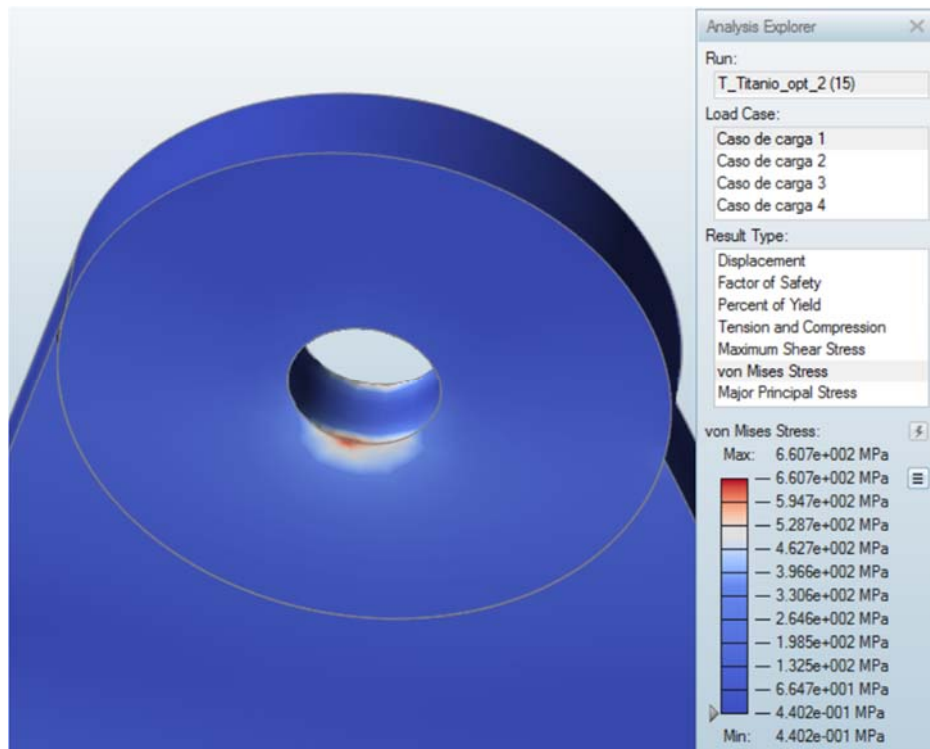


Figura A7.2. Modelo ajustado. Detalle de tensión máxima de Von Mises.

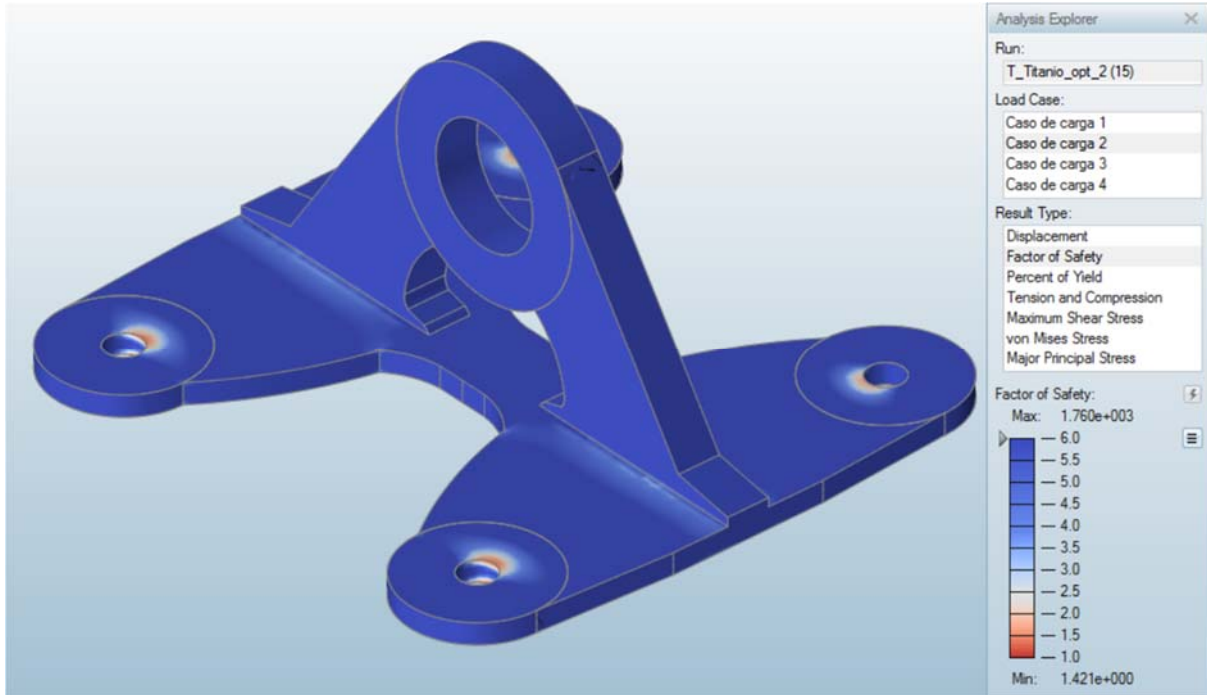


Figura A7.3. Modelo ajustado. Factor de seguridad.

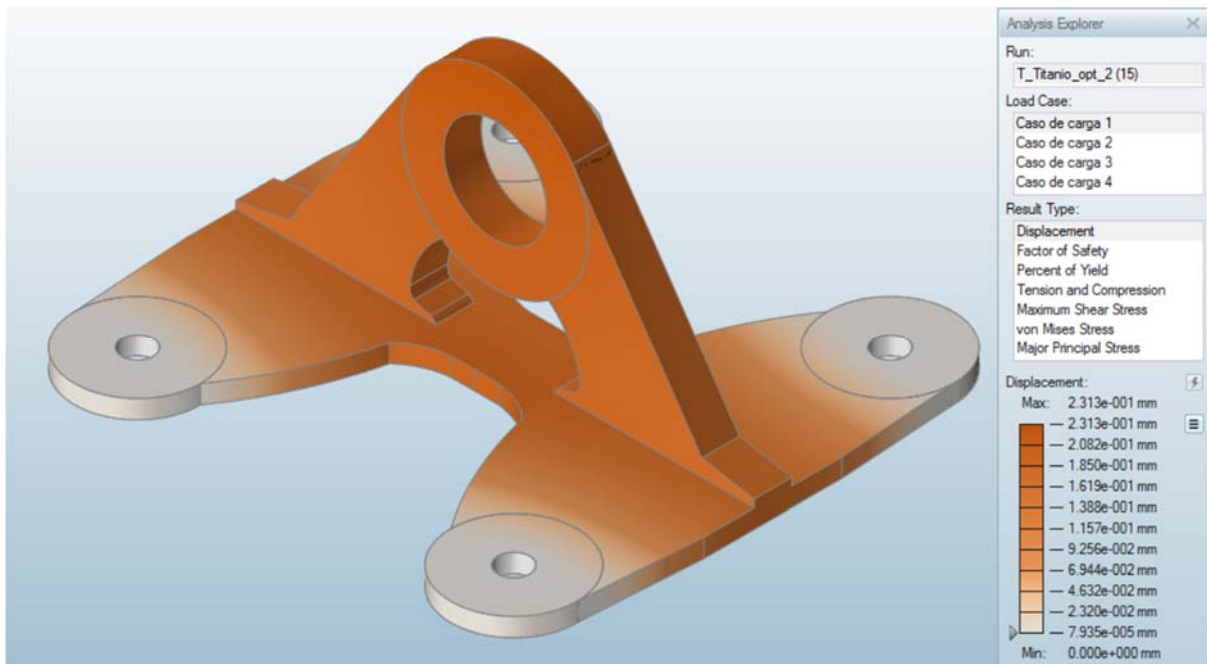


Figura A7.4. Modelo ajustado. Desplazamiento máximo.

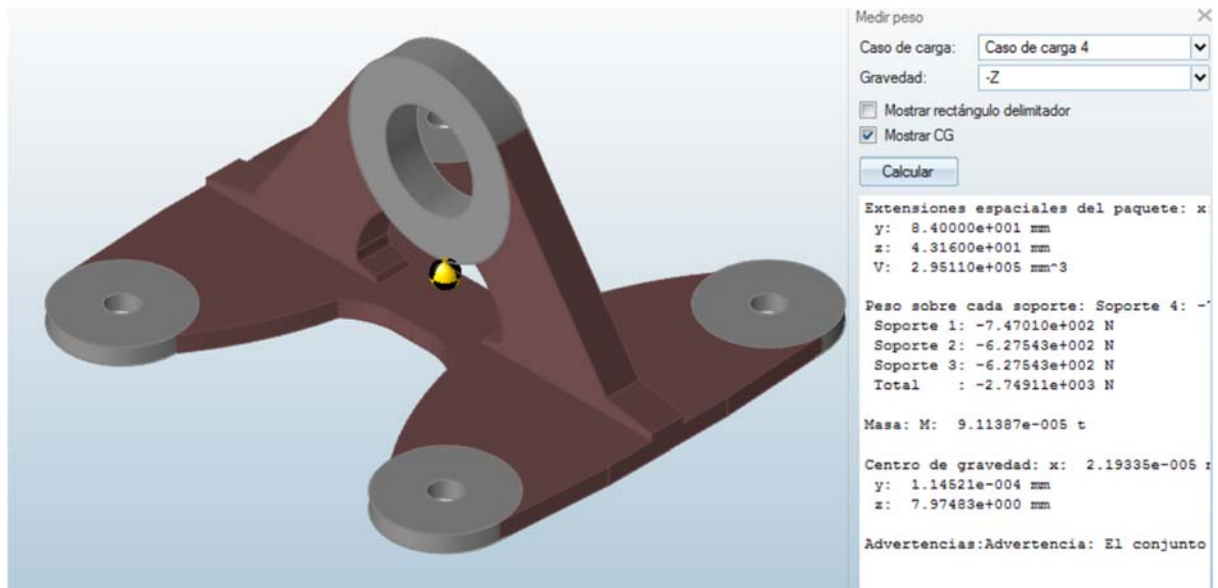


Figura A7.5. Modelo ajustado. Cálculo de masa.

ANEXO 8: Modelo ajustado. Segunda optimización y análisis

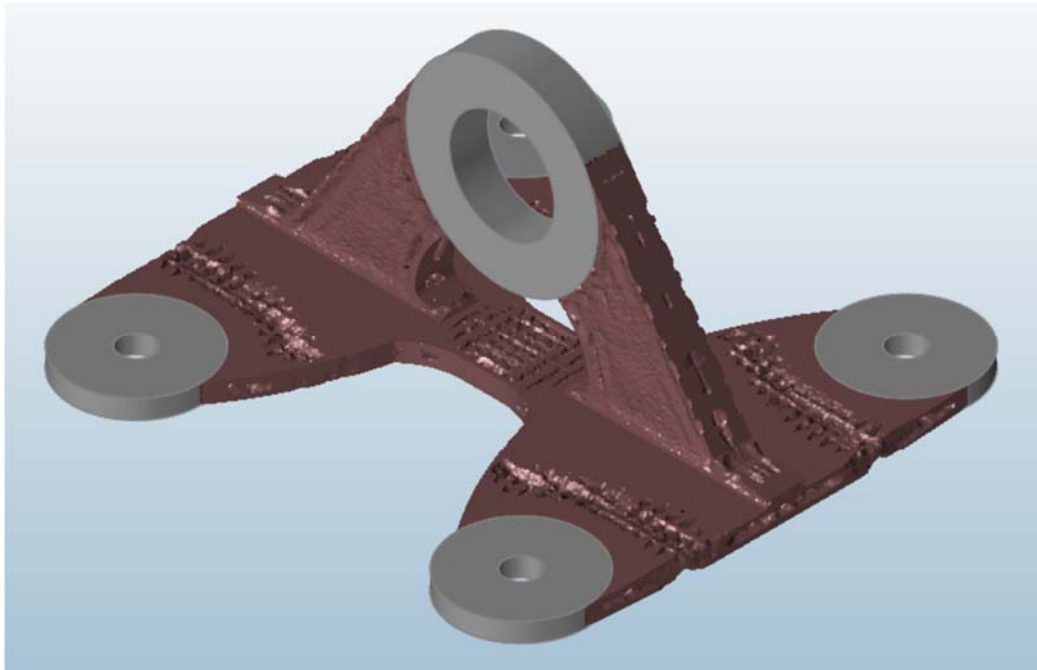


Figura A8.1. Modelo ajustado. Segunda optimización.

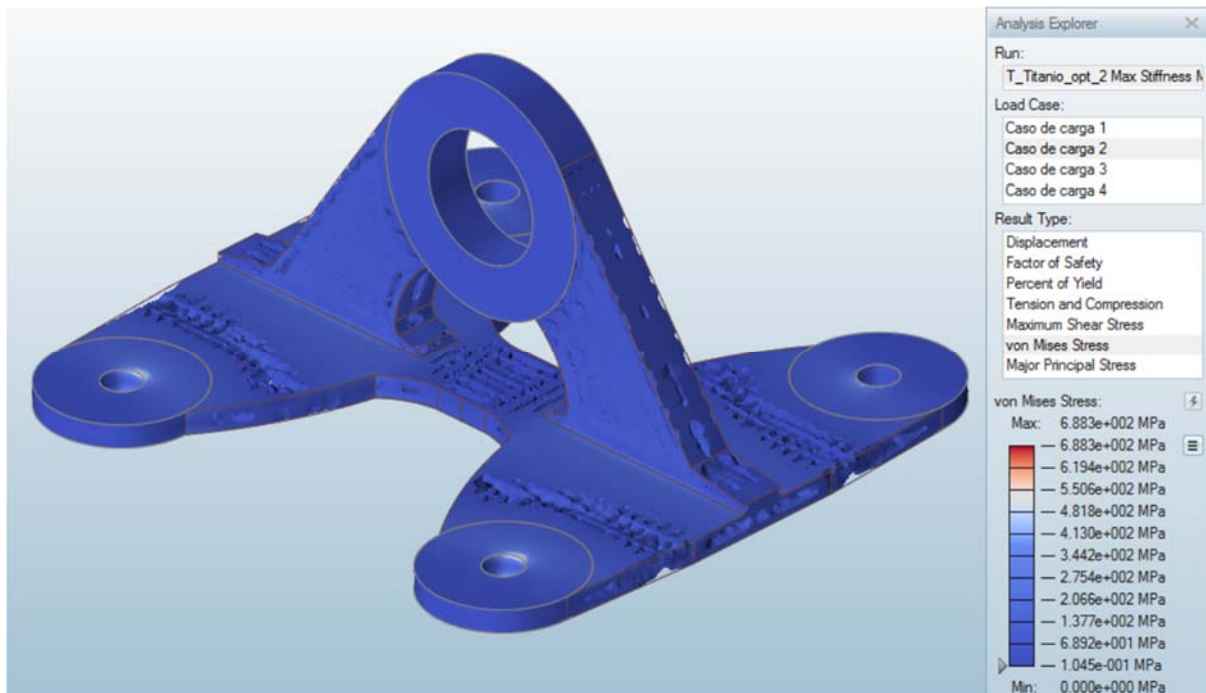


Figura A8.2. Modelo ajustado. Segunda optimización. Tensiones de Von Mises.

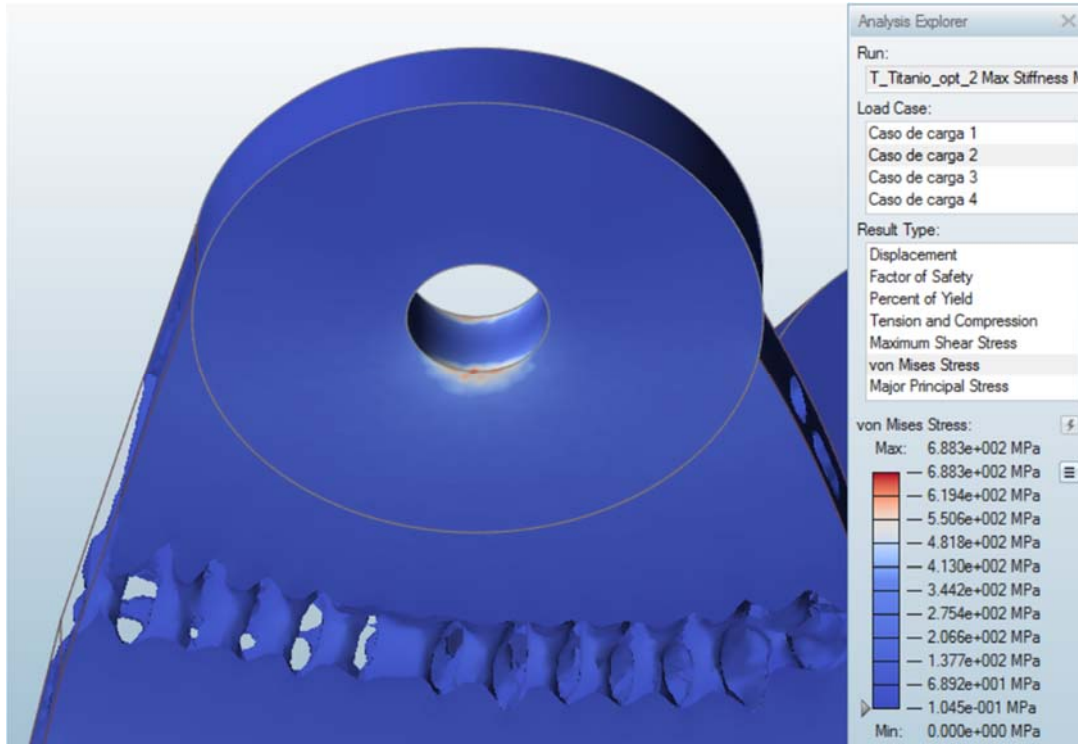


Figura A8.3. Modelo ajustado. Segunda optimización. Detalle de tensión máxima de Von Mises.

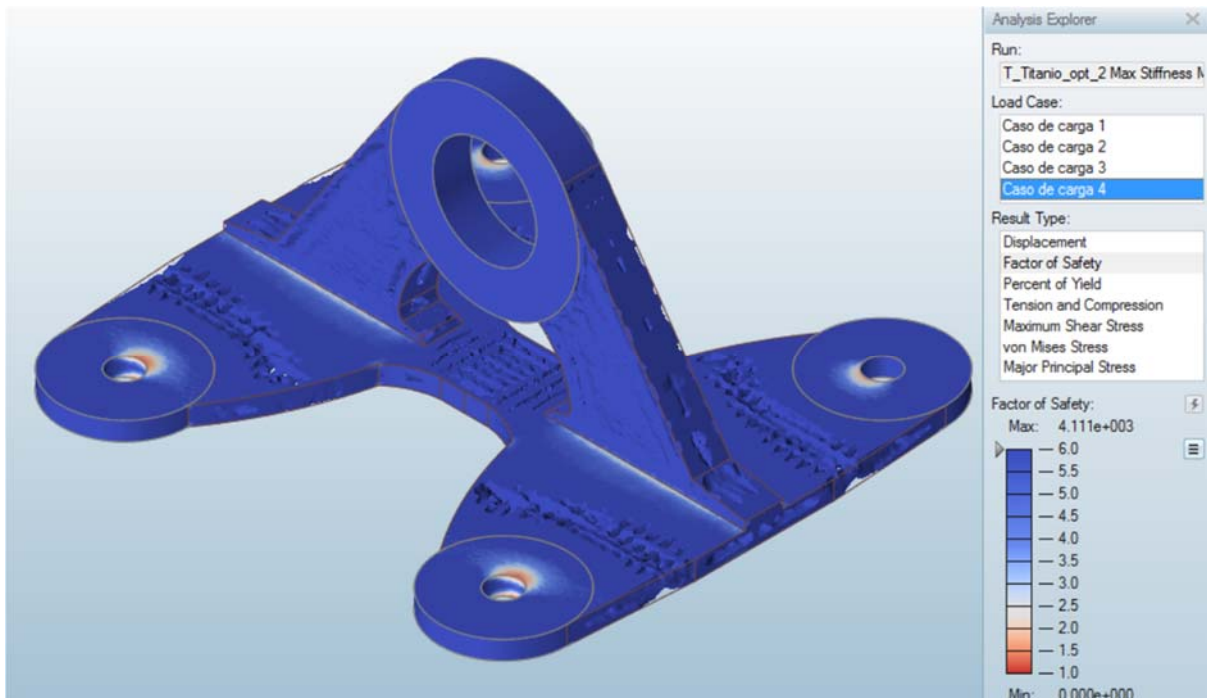


Figura A8.4. Modelo ajustado. Segunda optimización. Factor de seguridad.

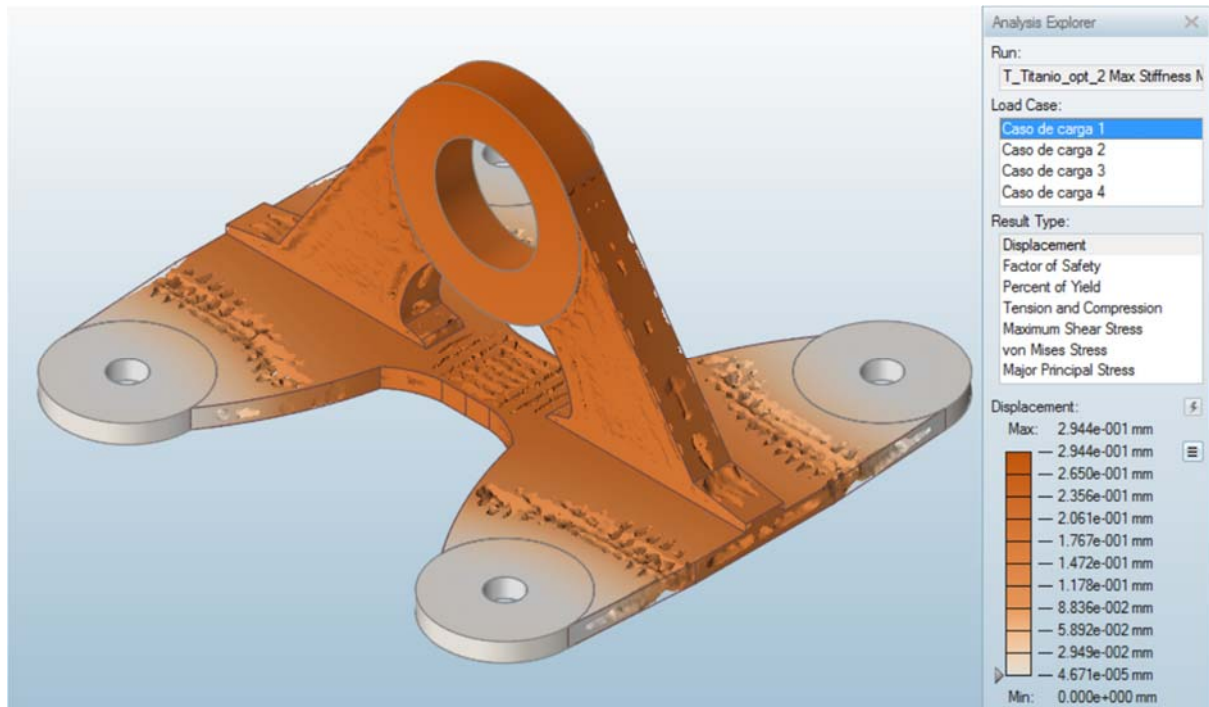


Figura A8.5. Modelo ajustado. Segunda optimización. Desplazamiento máximo.

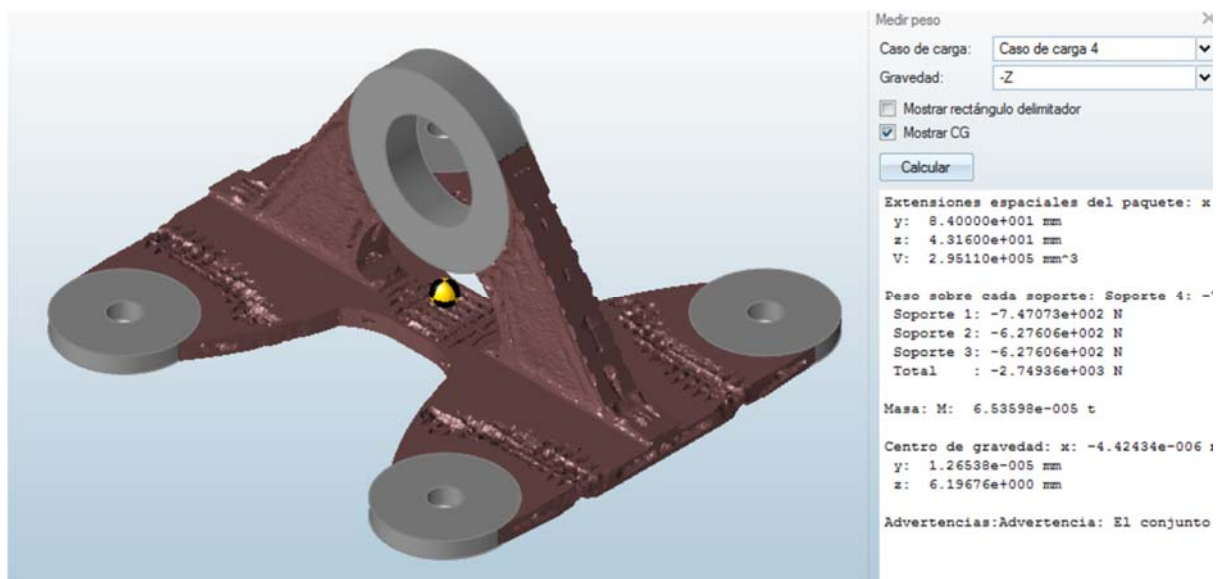


Figura A8.6. Modelo ajustado. Segunda optimización. Cálculo de masa.

ANEXO 9: Modelo ajustado final. Análisis

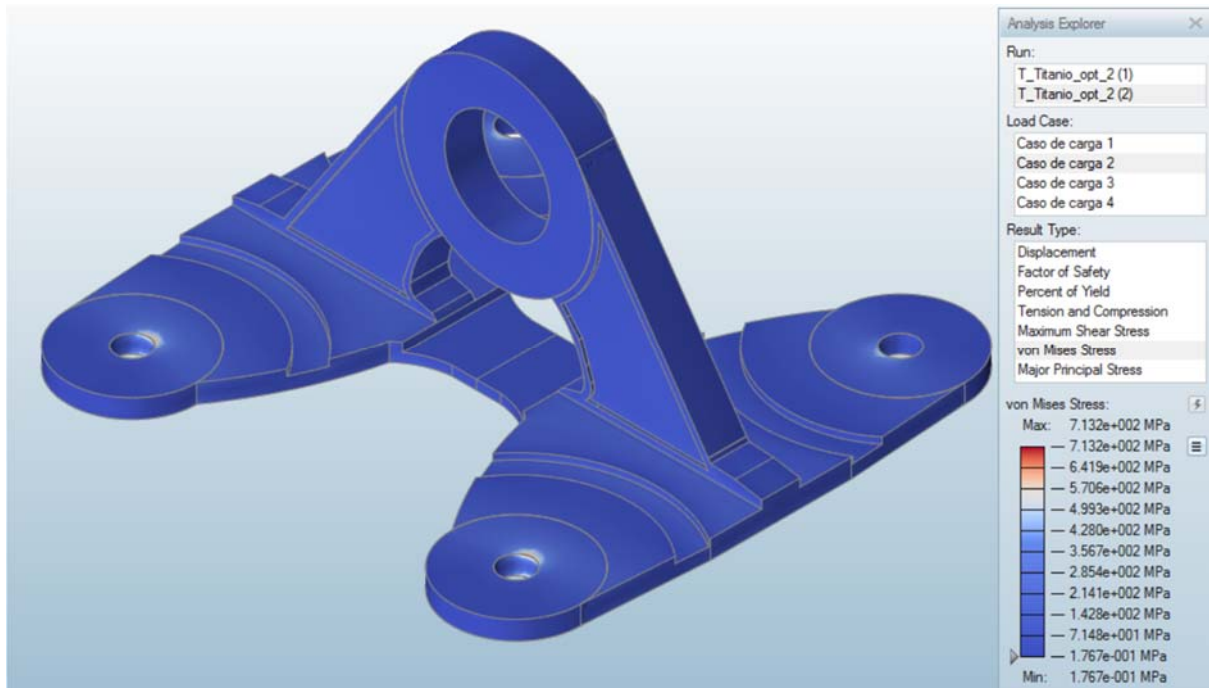


Figura A9.1. Modelo ajustado final. Tensiones de Von Mises.

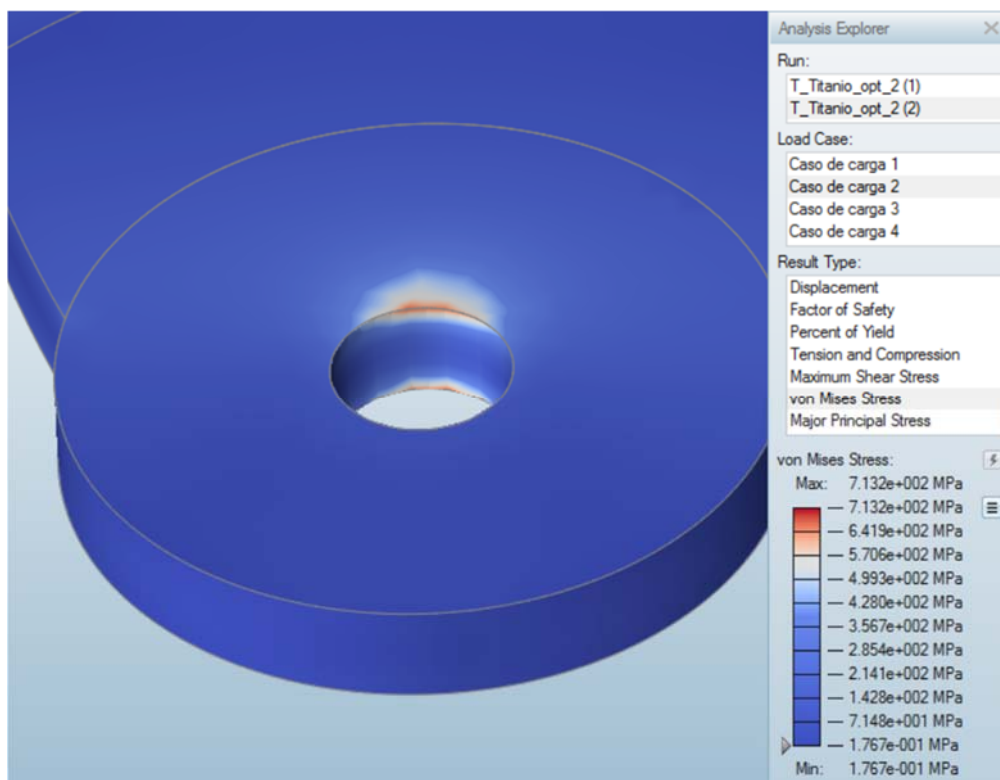


Figura A9.2. Modelo ajustado final. Detalle de tensión máxima de Von Mises.

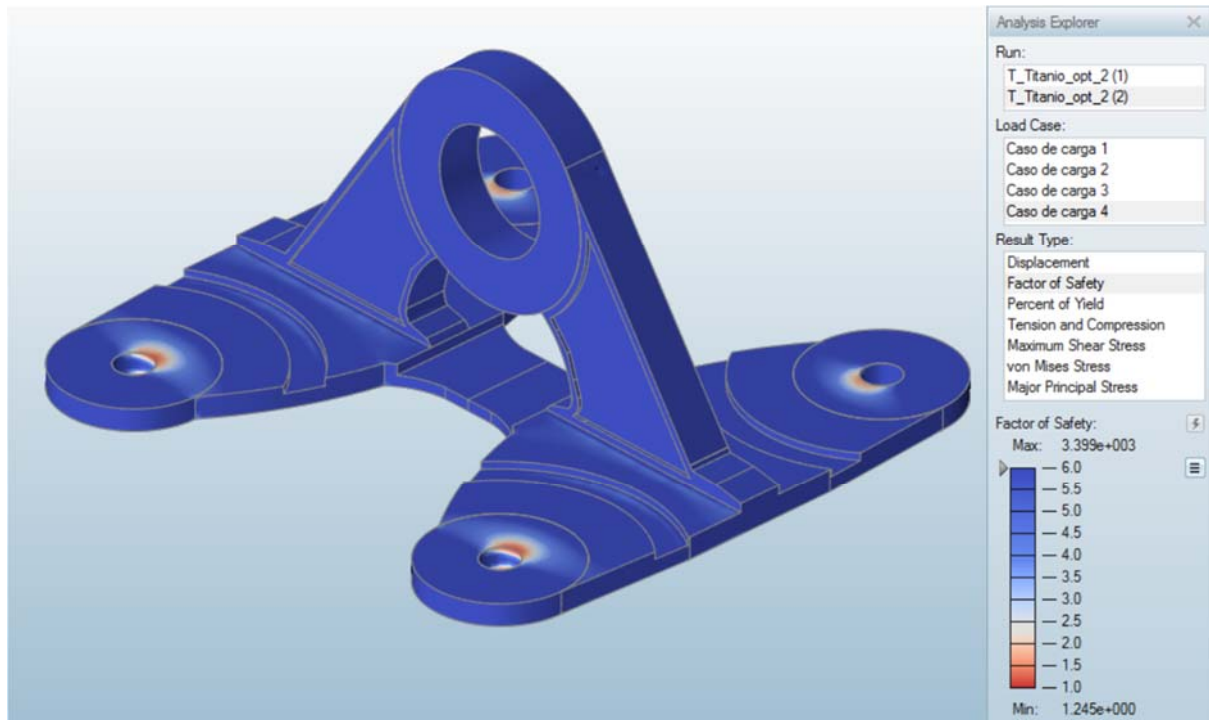


Figura A9.3. Modelo ajustado final. Factor de seguridad.

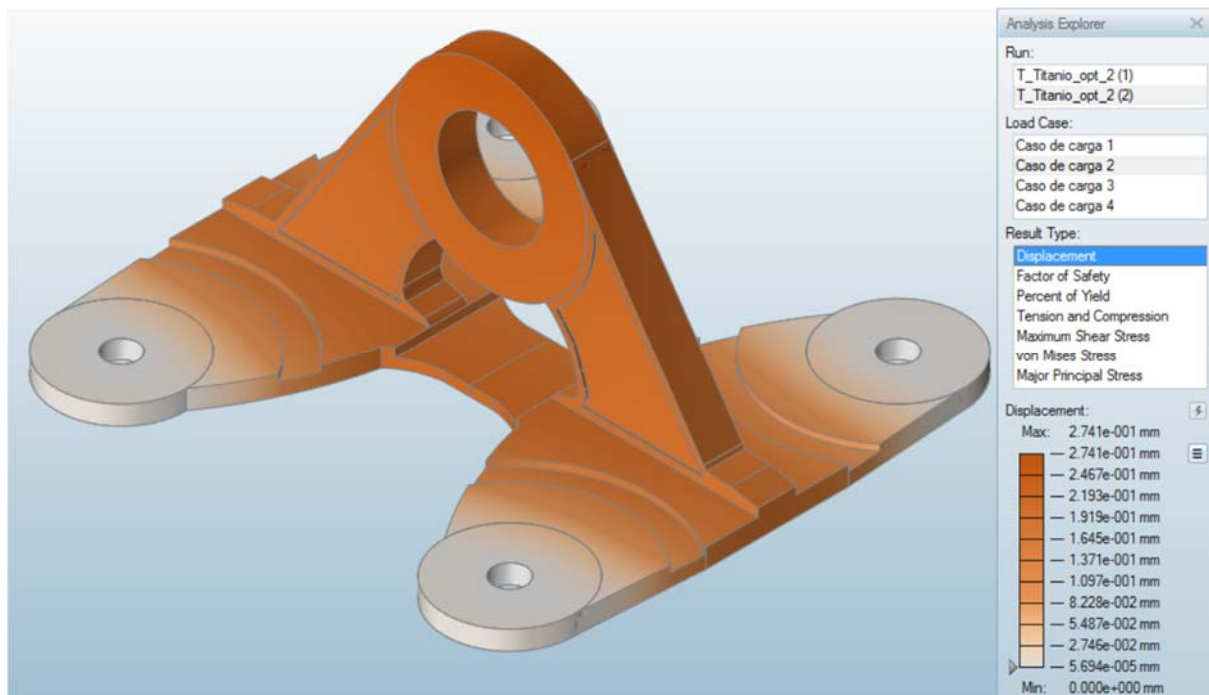


Figura A9.4. Modelo ajustado final. Desplazamiento máximo.

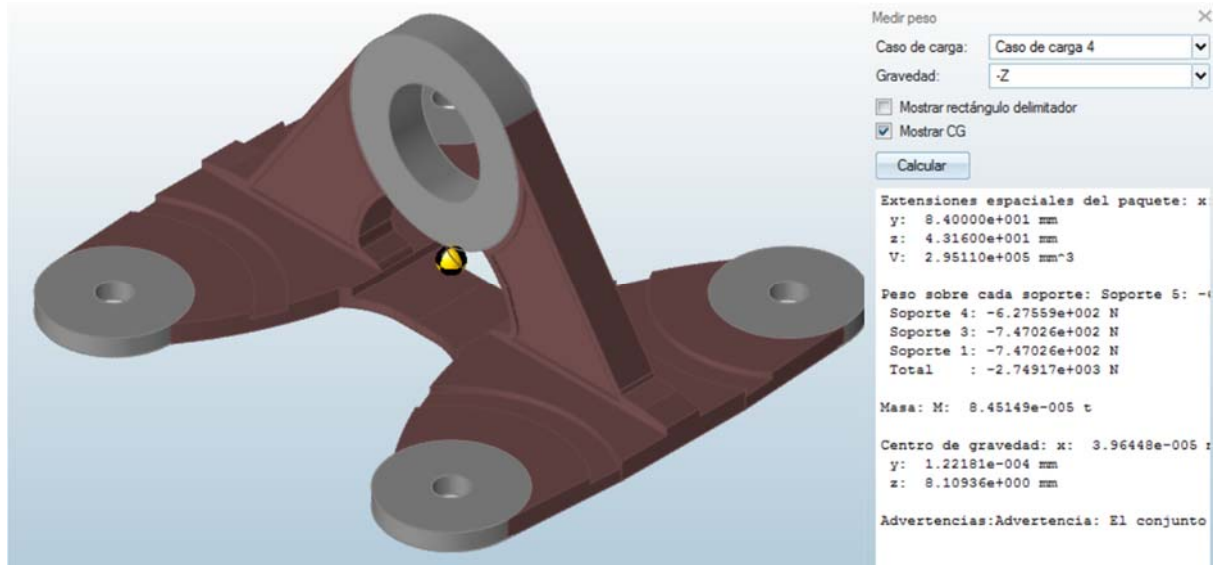


Figura A9.5. Modelo ajustado final. Cálculo de masa.

